3/2

De natuurkundige basis van de elektronica

Inhoud

3/2.1 **Inleiding**
(verschenen in de 53e aanvulling)

3/2.2 **De plaats van de elektronica in de natuurkunde**
(verschenen in de 53e aanvulling)

3/2.3 **Een kort historisch overzicht**
(verschenen in de 54e aanvulling)

3/2.4 **Het elektron, de basis van de elektronica**
(verschenen in de 55e aanvulling)

3/2.5 **Lading, veld, capaciteit en potentiaal**
(verschenen in de 60e aanvulling)

3/2.6 **Spanning, stroom, weerstand en vermogen**
(verschenen in de 61e aanvulling)

3/2.7 **Weerstanden en condensatoren in de praktijk**
(verschenen in de 62e aanvulling)

3/2.8 Magnetisme en elektromagnetisme

3/2.9 Elektromagnetische inductie

3/2.10 Wisselspanningen en -stromen

3/2.11 Wisselspanningen en -stromen in RLC-schakelingen

3/2.12 Het elektromagnetisch golfverschijnsel

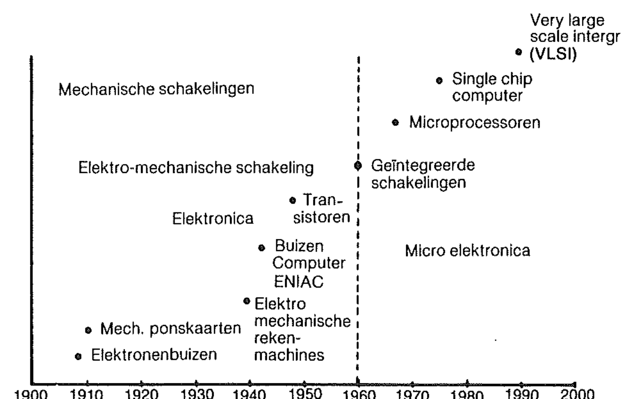
3/2.13 **Elektrochemie**
(verschenen in de 66e aanvulling)

3/2.14 De structuur van halfgeleiders

3/2

Voorwoord

Elektronica is een onderdeel van de elektriciteitsleer, die op zich weer behoort tot het vakgebied van de fysica. Elektronica omvat in grote lijnen de techniek van het besturen en regelen van signalen en de overdracht van informatie.
Elektronica is aan haar opmars begonnen na de uitvinding van actieve elektronische componenten.
Te beginnen met de elektronenbuis, uitgevonden in 1906 door L. de Forest en R. von Lieben, volgde aan het einde der veertiger jaren de door de Amerikanen Bardeen en Brattain ontwikkelde halfgeleiders (transistoren). In het begin van de jaren 60 werden in Amerika de eerste geïntegreerde schakelingen (IC's) ontwikkeld. Sindsdien is de elektronica in een stroomversnelling terecht gekomen, waarvan het eind nog niet in zicht is.
Het basisprincipe van de elektronica, waarbij door het met elkaar verbinden van afzonderlijke componenten een bepaalde functie wordt verwezenlijkt, is nauwelijks veranderd.
Hoewel de introductie van de gedrukte bedrading al een flinke kostenbesparing teweegbracht en een rationele wijze van het produceren in grote getallen mogelijk maakte, is de grote kostendoorbraak gekomen door de introductie van geïntegreerde schakelingen. Steeds meer componenten en steeds ingewikkelder functies kunnen door de verfijning van integratietechnieken op steeds kleinere oppervlakten worden gerealiseerd. Door massaproduktie van geïntegreerde schakelingen is de prijs zover gedaald, dat IC's ook binnen het bereik van de hobbyïst gekomen zijn.
De hobbyïst krijgt daardoor de mogelijkheid om van eenvoudige versterker tot (micro)computer toe zelf te bouwen.
Zelfs zonder specialistische kennis is de hobbyïst in staat relatief complexe schakelingen te maken van functies die met behulp van IC's zijn gerealiseerd.



Figuur 3/2-1: De grote doorbraak van het succes van de elektronica is gekomen in het begin van de zestiger jaren door de ontwikkeling van geïntegreerde schakelingen.
Werden op de eerste geïntegreerde schakelingen slechts enkele functies per 'chip' gerealiseerd (enkele poort schakelingen), thans ligt dit aantal functies reeds bij 1 miljoen per chip en het eind van deze verveelvoudiging van functies per oppervlakte-eenheid is nog niet in zicht.

Deel 3: Principes

3/2.1

Inleiding

Van de hoed en de rand

Vakjargon

De elektronicus, of hij/zij nu beroeps is of amateur, gebruikt een voor een leek onvoorstelbare hoeveelheid woorden uit het eigen vakjargon. Termen als "impedantie", "wisselstroom", "elektromagneet", "inductie", "magnetisch veld" lijken voor een elektronicus heel gewoon, maar zijn het uiteraard niet. Het is natuurlijk wel leuk om al die kennis te kunnen demonstreren, maar hoe diep gaat die kennis eigenlijk? Hebben deze woorden wel een diepere betekenis voor diegenen die ze uitspreken? Want, laten we wel wezen, als men zegt dat de elektronenstraal in een beeldbuis van een TV wordt afgebogen door het magnetisch veld van het afbuigjuk, wat bedoelt men dan precies? Wat is een elektronenstraal? Wat is zo'n magnetisch veld? En hoe komt het dat zo'n veld ontstaat in dat afbuigjuk?

Zeer fundamentele vragen, waarop het antwoord voor diegenen die er gevoelig voor zijn een zeer zinrijke verdieping van de hobby kan betekenen.

Diep de natuurkunde in

Wie antwoord wil op dergelijke vragen zal tevergeefs alle jaargangen van alle elektronica tijdschriften napluizen. Het antwoord op dergelijke vragen worden blijkbaar bekend veronderstelt of, wat waarschijnlijker is, de mensen die dergelijke tijdschriften vol schrijven stellen zich die vragen zélf niet!

"Hobby Elektronica" is een encyclopedisch naslagwerk over alle aspecten van de elektronica en vandaar dat in een dergelijk werk een antwoord op dergelijke fundamentele vragen wél thuis hoort.

In dit subdeel 3/2 wordt "De natuurkundige basis van de elektronica" aan de orde gesteld en wel in 14 hoofdstukken.

In die hoofdstukken zullen stap na stap, op een duidelijke manier, de soms ingewikkelde theorieën van de natuurkunde en dan in het bijzonder van de mechanica aan de orde komen. Natuurlijk zal deze cursus zich hoofdzakelijk richten op de vakgebieden "elektrotechniek" en "elektronica". Maar het zal duidelijk zijn dat de fundamenten van deze vakgebieden hun wortels hebben in de algemene mechanica. Vandaar dan ook, dat deze wortels eerst bloot gelegd moeten worden, alvorens de stamboom der elektrotechniek beklommen kan worden.

Wiskunde wel? Wiskunde niet!

Wie het woord natuurkunde hoort denkt onvermijdelijk aan schoolborden vol ingewikkelde wiskunde. Terecht, want de wiskunde speelt een belangrijke rol in het begrijpen en formuleren van de wetten van de mechanica en elektrotechniek.

2.1 Inleiding

Zelfs zo'n belangrijke rol dat bepaalde begrippen, zoals een veld of een elektromagnetische golf, in feite alleen wiskundig te formuleren zijn. Toch zal in deze cursus zeer zuinig met wiskunde worden omgegaan. Het is zelfs zo dat de differentiële wiskunde en de integraalvergelijkingen, die vaak een voor de hand liggende oplossing bieden voor talrijke vragen, volledig buiten beschouwing zullen blijven. Dat door deze beperking bepaalde verschijnselen niet zo eenduidig verklaard kunnen worden als mét deze wiskundige theorieën moet dan maar voor lief worden genomen. Wél veronderstellen wij dat de lezer(es) de openheid heeft om niet meteen bij de eerste simpele formule die in de tekst staat de lektuur te staken. Van de lezer(es) wordt dus verondersteld dat een wiskundige formule als:

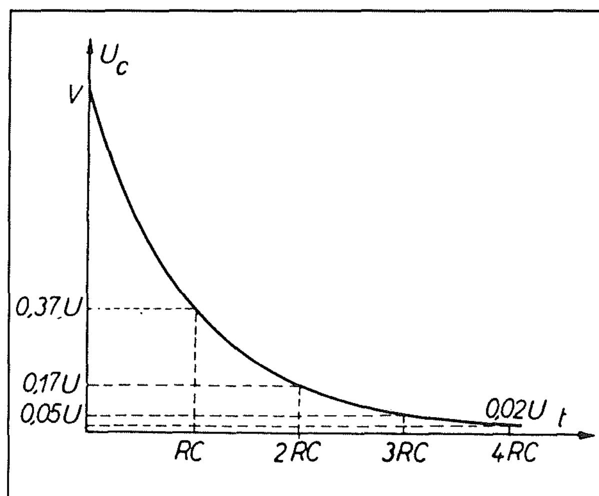
v = s/t

kan geïnterpreteerd worden als "de grootheid v is gelijk aan de deling van de grootheid s door de grootheid t".
Of dat:

Z = 1/(2.π.f.C)

net zo duidelijk is als de tekst "de grootheid Z is gelijk aan de eenheid, gedeeld door de vermenigvuldiging van de grootheid f met de grootheid C, product dat nadien weer vermenigvuldigd wordt met het getal 2 en nadien met het getal π".
Echt, meer wiskunde kennis wordt er in deze cursus niet verwacht!

Grafieken
Ook belangrijk is dat men in staat is eenvoudige tweedimensionele grafieken te interpreteren. Als men bijvoorbeeld de grafiek van figuur 3/2.1-1 onder ogen krijgt, moet begrepen worden dat dit figuurtje het verband geeft tussen de waarde van een bepaalde grootheid U_C en het verloop van de tijd t.



Figuur 3/2.1-1: Het interpreteren van dergelijke eenvoudige grafieken vormt een belangrijk kenniselement voor deze cursus.

Uit zo'n grafiek moet meteen duidelijk worden dat de grootheid U_C op het tijdstip t = 0 een waarde heeft van V. Na een bepaald tijdsverloop RC is de waarde van de grootheid gedaald tot 0,37U, etc.

Wiskundige hulpmiddelen
Een studie van de elektrotechniek is niet mogelijk zonder beroep te doen op enkele wiskundige hulpmiddelen. Een daarvan is al besproken, namelijk het interpreteren van tweedimensionele grafieken. Daarnaast vormen echter ook de vectorwiskunde en de wiskunde van de imaginaire getallen onontbeerlijke gereedschappen voor het begrijpen van de elektronica. Beide hulpmiddelen zullen op de gepaste plaats summier worden uitgelegd, zodat men er de eenvoudige truukjes mee kan uithalen die voor het begrijpen van de theorie noodzakelijk zijn.

2.1 Inleiding

Veertien hoofdstukken

Inleiding
Er wordt in dit subdeel 3/2 een poging gewaagd om honderden jaren van menselijke vooruitgang op het gebied van het begrijpen van de magnetische en elektrische verschijnselen van de natuur in veertien hoofdstukken samen te bundelen.
In het kort een overzicht van wat men kan verwachten.

Hoofdstuk 1:
Inleiding
Dit is dit hoofdstukje en voorwaar, niemand zal kunnen beweren dat dit ingewikkeld of moeilijk te begrijpen is!

Hoofdstuk 2:
De plaats van de elektronica in de natuurkunde
In dit hoofdstuk worden enige basisbegrippen van de mechanica, want dat is de tak van de natuurkunde waar de elektrotechniek onder valt, verklaard. Men leert wat bijvoorbeeld velden zijn, wat kracht en beweging is en wat de begrippen arbeid, energie en vermogen voorstellen. Verder wordt verklaard wat mechanische grootheden zijn, hoe deze wiskundig gedefinieerd worden en met welke eenheden zij worden uitgedrukt. Tot slot wordt de vectorwiskunde geïntroduceerd.

Hoofdstuk 3:
Een kort historisch overzicht
In dit hoofdstuk wordt een kort historisch overzicht gegeven van het denken over de verschijnselen waar deze cursus over gaat. Hoe de mensheid bijvoorbeeld al heel vroeg vaststelde dat sommige metalen andere metalen aantrokken en hoe men miniatuur bliksems kon maken door een kat met een wollen doek te wrijven. Dit hoofdstuk behandelt dus het denken over magnetisme en elektriciteit vóór de wetenschap in staat was deze begrippen onmiddellijk aan een wiskundig exacte verklaring te koppelen.

Hoofdstuk 4:
Het elektron, de basis van de elektronica
In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de bouw van de stof tot op het atoom-niveau. Men leert wat vrije elektronen zijn en waarom sommige stoffen elektriciteit uitstekend geleiden en andere dat helemaal niet doen.

Hoofdstuk 5:
Statische elektriciteit, het elektrisch veld en lading
Drie begrippen die niet los van elkaar gekoppeld kunnen worden en bovendien de basis vormen van alles wat met elektrotechniek te maken heeft. De experimenten met katten en wollen doeken worden nu in een wetenschappelijk perspectief geplaatst, zodat de vonkjes iets meer worden dan miniatuur bliksems, namelijk fundamentele uitingen van de elektrische eigenschappen van de natuur.

Hoofdstuk 6:
Spanning, stroom, weerstand en vermogen
In dit hoofdstuk komt (eindelijk) de dagelijkse praktijk aan de orde. Van de wetenschappelijke definitie van het begrip elektrische spanning is het maar een kleine stap naar stroom, weerstand en vermogen.
Uiteraard komen in dit hoofdstuk de zeer praktische wetten van Ohm, Kirchhoff en Thévenin aan de orde. Als men die drie formules beheerst, dan komt men een heel eind in de elektronica!

2.1 Inleiding

Hoofdstuk 7:
Capaciteit
Nu weer even naar de ver van de praktijk staande theorie.
Een condensator, dat praktische ding, blijkt theoretisch best wel moeilijk te vatten! Maar nadien wordt het weer uitermate praktijkgericht, met de universele laad- en ontlaadwetten van condensatoren als hoogtepunt.

Hoofdstuk 8:
Magnetisme en elektromagnetisme
Een theoretisch intermezzo om in het volgende hoofdstuk dagelijkse praktische zaken als zelfinducties, spoelen en transformatoren te kunnen vatten.

Hoofdstuk 9:
Elektromagnetische inductie
Als eenmaal dit natuurkundige verschijnsel begrepen is, dan is de werking van spoelen en transformatoren verder kinderspel.

Hoofdstuk 10:
Wisselspanningen en -stromen
In dit hoofdstuk komt weer wat wiskunde om de hoek kijken, want de eigenschappen van wisselspanningen zijn nu eenmaal niet te begrijpen als men niet iets afweet van de trillingsleer. Vandaar dat de begrippen sinus en cosinus worden geïntroduceerd, voor vele niet-wiskundig onderlegde lezers(essen) misschien dé gelegenheid om eindelijk te snappen waarom men het steeds heeft over sinusoidale spanningen!

Hoofdstuk 11:
Wisselspanningen
en -stromen in RLC-schakelingen
Dat wordt even doorbijten, want hoe een condensator of een spoel zich gedraagt onder het regime van een wisselspanning kan alleen maar uitgelegd worden aan de hand van de imaginaire rekenkunde. Maar als dat vreemdsoortige begrip verteerd is, kan men eindelijk écht begrijpen waarom een LC-kring zo uitstekend in staat is bepaalde frequentiebanden te versterken of te verzwakken.

Hoofdstuk 12:
Het elektromagnetisch golfverschijnsel
Zonder enige twijfel het moeilijkst hoofdstuk uit deze cursus! Want er wordt gepoogd, zonder hogere wiskunde, uit te leggen hoe storingen in een magnetisch of elektrisch veld in staat zijn elektromagnetische golven op te wekken. Iets waar Maxwell een heel dik boek vol berekeningen voor nodig had! De elektromagnetische golf: het unieke natuurkundige verschijnsel, waardoor het heelal het licht kreeg en de aarde de stortvloed van telecommunicatie moet zien te behappen.

Hoofdstuk 13:
Elektrochemie
Nu weer even terug naar wat aardsere dingen. In dit hoofdstuk komt het transport van vrije elektronen door waterachtige oplossingen aan de orde. Met als praktisch gevolg batterijen, kwikcelletjes en de herlaadbare NiCad-accumulatoren.

Hoofdstuk 14:
De structuur van halfgeleiders
Tot slot weer helemaal terug naar af. In feite hoort de stof van dit hoofdstuk bij hoofdstuk 4.
Maar de studie van halfgeleidende materialen heeft weinig te maken met de elektrotechniek, waar het tot hoofdstuk 13 hoofdzakelijk over gaat. Vandaar de beslissing om aan halfgeleiders een eigen hoofdstuk te wijden.

3/2.2

De plaats van de elektronica in de natuurkunde

De natuurkunde, de basis van alle kennis

Inleiding

Een fanatieke elektronica hobby-ist, die dagelijks in zijn of haar laboratorium knutselt, zal zich waarschijnlijk nooit de vraag *"waardoor komt het nu, zuiver natuurkundig bekeken, dat deze schakeling werkt zoals zij werkt?"* stellen. Toch is deze vraag heel fundamenteel. Voor de leek lijkt het immers vaak alsof elektronische schakelingen het werk zijn van super-tovenaars, die materie alles kunnen laten doen wat zij willen. Niets is echter minder waar! Elektronica is een tak van de natuurkunde en als dusdanig onderworpen aan strenge wiskundige wetten en fysische regels. Sterker nog, de elektronica is zo streng ingebed in de mechanica, dat men van alle elektronische schakelingen mechanische equivalenten kan opstellen en er nadien de traditionele formules van de mechanica op kan toepassen.

Anderzijds is het mogelijk ieder mechanisch probleem om te zetten in een equivalente elektronische schakeling. De spanningen, die uit die schakeling komen, gedragen zich dan net zo in functie van de tijd als de oorspronkelijke mechanische grootheden die men wilde onderzoeken. Van dit feit wordt gebruik gemaakt in zogenoemde "analoge computers" waarmee men ingewikkelde mechanische processen, zoals bijvoorbeeld de werking van een kerncentrale, zuiver elektronisch kan simuleren en kan voorspellen hoe de kerncentrale zich onder bepaalde omstandigheden zal gedragen.

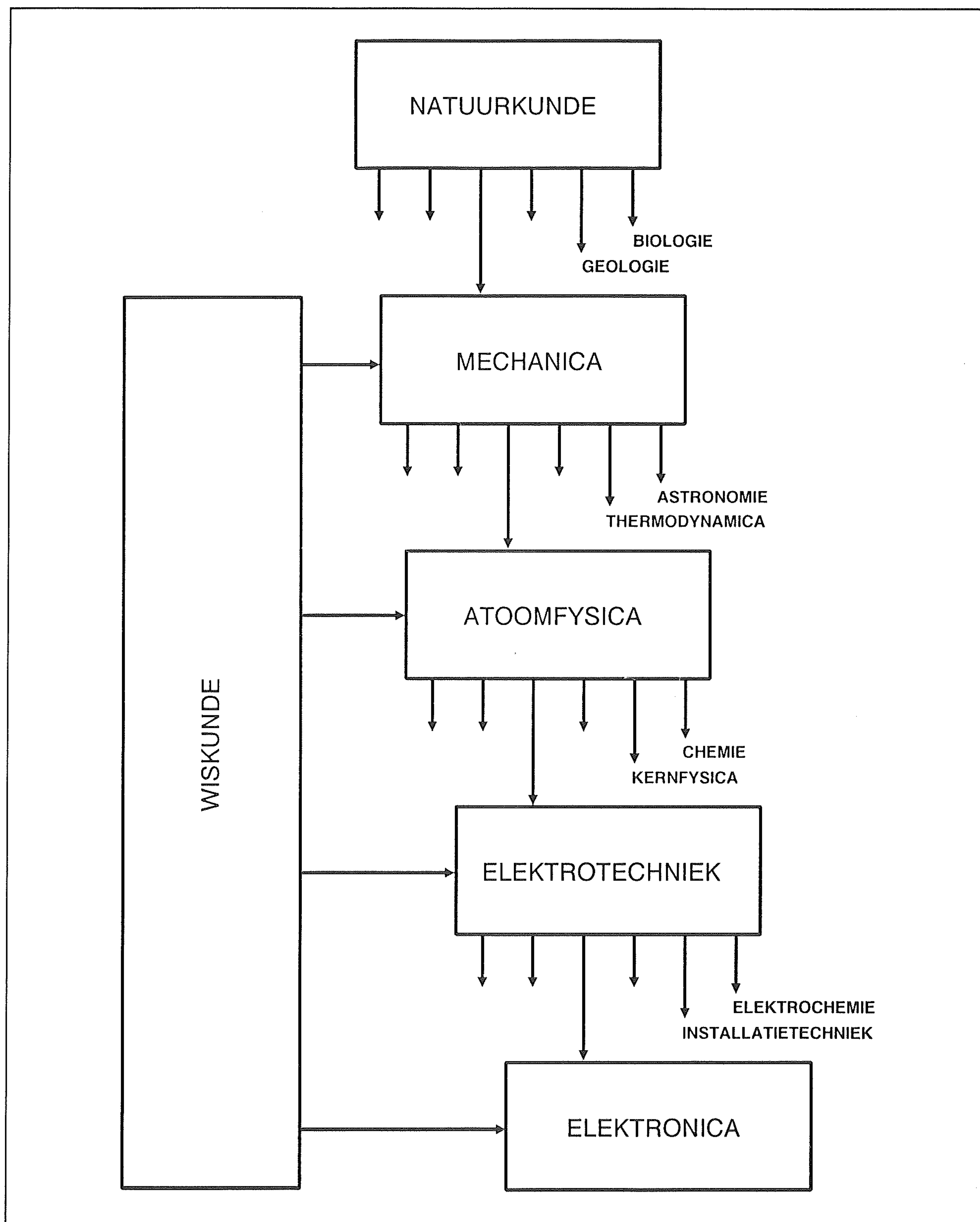
De plaats van de elektronica in de natuurkunde

Het is dus interessant om te onderzoeken waar de elektronica in het heel brede gebied van de natuurkunde thuis hoort. In figuur 3/2.2-1 is een poging gewaagd het verband tussen de natuurkunde en de elektronica duidelijk te maken.

Aan de top van de "piramyde van kennis" staat uiteraard de natuurkunde. Natuurkunde is te omschrijven als de wetenschap die zich bezig houdt met het ontrafelen, begrijpen en ondubbelzinnig definiëren van de structuur van de natuur. Dat is uiteraard een heel breed terrein en omvat zaken als "biologie", de wetenschap van de levende organismen, "geologie", de wetenschap van het ontstaan en de evolutie van de aarde, maar ook "mechanica".

De mechanica is de tak van de natuurkunde die zich bezig houdt met het begrijpen van voorwerpen die in beweging zijn. Omdat zowat alles in de natuur op de een of andere manier in beweging is zal het duidelijk zijn dat ook de mechanica een zeer breed terrein bestrijkt.

2.2 De plaats van de elektronica in de natuurkunde



Figuur 3/2.2-1: De plaats van de elektronica binnen de natuurkunde.

2.2 De plaats van de elektronica in de natuurkunde

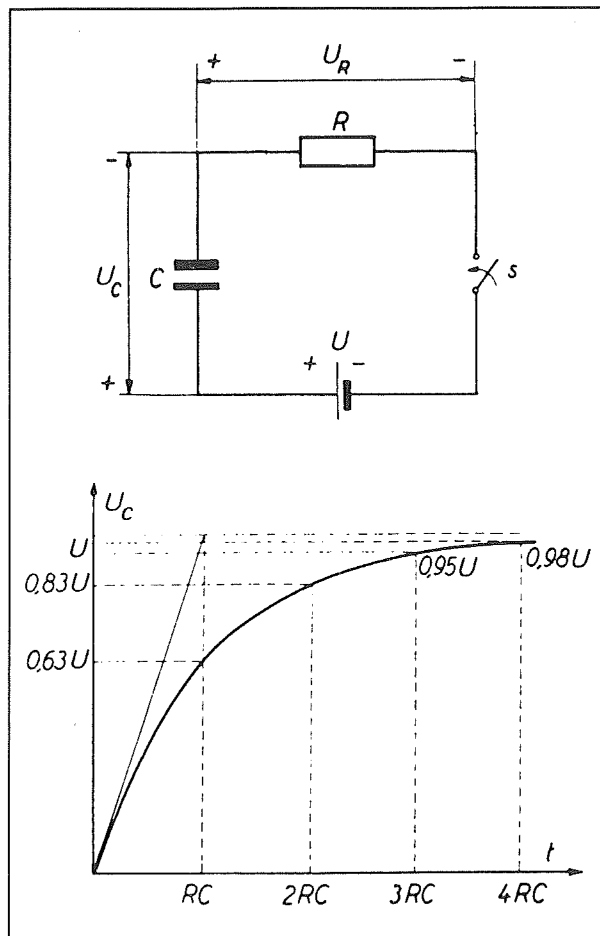
Zo houdt bijvoorbeeld de "astronomie" zich bezig met het bestuderen van de bewegingen van sterren en sterrenstelsels in het heelal. De "thermodynamica" houdt zich bezig met het bestuderen van de bewegingen die ontstaan in hete gassen en vloeistoffen.
Een van de belangrijkste takken van de mechanica is echter de "atoomfysica". Deze wetenschap bestudeert de bouw en beweging van de materie op sub-microscopisch kleine schaal. De atoomfysica houdt zich dus bezig met het bestuderen van de onderlinge bewegingen van atomen.
Ook die tak van de natuurkunde kan echter weer in diverse specialismen gesplitst worden. Het eerste specialisme in de "chemie" of scheikunde. Deze wetenschap bestudeert de bindingen die atomen met elkaar kunnen aangaan en alles wat uit deze verbindingen ontstaat. De chemie is verantwoordelijk voor de stortvloed van nieuwe synthetische stoffen waarmee de wereld ten goede en ten kwade wordt overspoeld.
Een tweede tak van de atoomfysica is de kernfysica. Deze bestudeert de bewegingen van de deeltjes die zich in de kern van ieder atoom bevinden. Deze wetenschap heeft niet alleen de atoom-, waterstof- en neutronenbommen op haar geweten, maar ook in principe nuttige zaken zoals kernenergiecentrales, hartstimulatoren met batterijen met een levensduur die langer is dan die van de mens, nucleaire geneeskunde en niet-destructief materiaalonderzoek.
De tak van de atoomfysica die in het kader van de elektronica van belang is, is echter de "elektrotechniek". Deze tak van de mechanica houdt zich bezig met de eigenschappen van elektronen die uit hun normale atoomverband zijn gestoten. Of, met andere woorden, met de eigenschappen van vrije elektronen die door geleiders en halfgeleiders vloeien en daardoor elektrische stromen opwekken. Omdat bewegende elektronen een magnetisch veld veroorzaken zit het begrip "magnetisme" onlosmakelijk verankerd in de elektrotechniek.
De elektrotechniek heeft weer verschillende takken. De "elektrochemie" houdt zich bezig met de manier waarop vrije elektronen door waterachtige vloeistoffen stromen en batterijen en energiecellen vormen. De "installatietechniek" houdt zich voornamelijk bezig met de manier waarop vrije elektronen massaal door geleiders verplaatst kunnen worden, zoals in elektrische centrales, hoogspanningsnetten en motoren.
De "elektronica" is die tak van de elektrotechniek die onderzoekt hoe kleine stromen van vrije elektronen veel grotere stromen van vrije elektronen kunnen opwekken. Of, met andere woorden, hoe men de eigenschappen van vrije elektronen kan gebruiken om elektrische stromen te versterken.

Terug naar de "roots"!

Wie nu denkt dat men alle verschijnselen uit het blokje "elektronica" kan verklaren zonder terug te grijpen naar zaken die in vorige blokjes thuis horen, heeft het uiteraard mis. Voor de verklaring van een voor de elektronica zeer fundamenteel begrip als "vrije elektronen" moet men terug naar het blokje "atoomfysica". En voor de verklaring van het begrip "magnetisch veld", zo belangrijk voor het begrijpen van de werking van een beeldbuis, moet men terug naar het blokje "elektrotechniek". Vandaar dat een van de volgende hoofdstukken dan ook de fundamentele ontdekkingen van de atoomfysica zal behan-

2.2 De plaats van de elektronica in de natuurkunde

delen, voor zover die natuurlijk passen in het verhaal van de elektronica.



Figuur 3/2.2-2: Het spanningsverloop over een opladende condensator kan in een zeer exacte wiskundige formule worden beschreven.

Wiskunde

Naast de blokken "mechanica"' "atoomfysica", "elektrotechniek" en "elektronica" is een groot blok "wiskunde" getekend. De wiskunde speelt een zeer belangrijke rol, zowel bij het verklaren als bij het formuleren van de verschijnselen die in de gehele mechanica optreden.

Als men een condensator C van 1 µF via een weerstand R van 1 kΩ oplaadt uit een spanningsbron U van 10 V, zoals getekend in figuur 3/2.2-2, dan zal de spanning U_c over de condensator volgens een welbepaald verloop stijgen in functie van de laadtijd. Dat verloop is exact te omschrijven in een wiskundige formule. Als men deze wiskundige formule gevonden heeft, is het vanaf dat moment niet meer nodig experimenteel te bepalen hoe groot de spanning na 2 seconde over een condensator van 4,7 µF zal zijn als die wordt geladen via een weerstand van 330 kΩ uit een spanningsbron van 65 V. Het volstaat deze nieuwe waarden in de formule in te vullen en men kan het antwoord op de vraag volgens een zuiver wiskundige manier berekenen, zonder één meting te verrichten.

Determinisme

Men noemt het hele gebied van de mechanica daarom "deterministisch". Als men de noodzakelijke beginvoorwaarden voor het tot stand komen van een bepaald mechanisch verschijnsel kent en men weet de wiskundige formules waaraan dat verschijnsel voldoet, dan weet men voldoende om de resultaten van het verschijnsel te kunnen berekenen. Gebeurtenissen in de mechanica (en dus ook in de elektronica) volgen altijd uit hun beginvoorwaarden en uit hun wiskundige formules! Alle gebeurtenissen zijn dus als het ware volledig voorbestemd, dus deterministisch.

Klassieke mechanica

Historisch overzicht van de mechanica

In het overzicht van figuur 3/2.2-1 staat in het tweede blokje het woord "mechanica". Dat is een vrij onnauwkeurige benaming,

2.2 De plaats van de elektronica in de natuurkunde

omdat er op dit moment twee soorten mechanica bestaan. De eerste noemt men de "klassieke mechanica". Dat is de kennis van de mechanica zoals die rond de eeuwwisseling bestond. Deze klassieke mechanica is samengesteld uit de theorieën over de aantrekkingskracht tussen lichamen (in 1685 door Newton opgesteld) en uit de theorieën over het elektrisch en magnetisch veld (rond 1860 door Maxwell op papier gezet). Beide theorieën geven een uitstekende verklaring en een volledig deterministische wiskundige beschrijving van de eigenschappen van de mechanica die op "aardse schaal" waar te nemen zijn. Maar verlegt men het onderzoeksterrein naar het hele kleine (kernfysica) of naar het hele grote (astronomie), dan blijkt dat deze klassieke mechanica bepaalde verschijnselen niet kan verklaren. Om een voorbeeld te noemen, het is met de klassieke mechanica absoluut onmogelijk om te verklaren waarom elektronen alleen in bepaalde banen rond de atoomkern kunnen draaien.

Quantum mechanica

Tussen de jaren 1910 en 1940 werd daarom een nieuw soort mechanica ontwikkeld, die algemeen de "quantum mechanica" wordt genoemd. Deze theorie kon ontstaan doordat Einstein met zijn beroemde "relativiteitstheorie" de weg had geëffend om op een heel andere manier over natuurkundige verschijnselen na te denken.

Een van de voornaamste ontdekkingen van de quantum mechanica is dat verschijnselen op zeer kleine schaal absoluut niet deterministisch zijn! Volgens de quantum mechanica is het bijvoorbeeld onmogelijk om de plaats van een elektron dat rond een atoomkern draait nauwkeurig te bepalen. Men kan hoogstens de plaats berekenen waarop men de meeste kans heeft dat elektron aan te treffen! Dat wil overigens niet zeggen dat daarmee het determinisme van de klassieke mechanica niet meer geldig is. Bij verschijnselen op "aardse schaal" heeft men te maken met bewegingen van miljarden en miljarden elektronen tegelijk. Het niet te voorspellen gedrag van ieder elektron afzonderlijk wordt in die veelheid van deelnemende deeltjes als het ware gemiddeld, zodat het gedrag van alle deeltjes samen wél deterministisch beschreven kan worden. Men zou dus kunnen zeggen dat de wiskundige formules van de klassieke mechanica de aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid beschrijven dat de deeltjes zich gaan gedragen zoals de wiskundige formules voorschrijven.

Een tweede belangrijke ontdekking van de quantum mechanica is dat het fundamenteel verschil dat de klassieke mechanica maakt tussen "materie" en "veld" niet terecht is. "Materie" en "veld" zijn beide uitingen van een en hetzelfde fundamenteel verschijnsel, dat men het best kan omschrijven met de term "energie". Dit noemt men het "dualiteitsbeginsel" van het heelal. Soms uit die energie zich onder de vorm van materie, soms onder de vorm van een veld. Zoals uit een volgend hoofdstuk zal blijken, uiten velden zich onder de vorm van golfverschijnselen met een bepaalde golflengte en een bepaalde frequentie.

Dat betekent dus dat één verschijnsel, stel licht, zich zowel onder de vorm van deeltjes als onder de vorm van een golfverschijnsel kan manifesteren.

In de elektronica wordt men vaak geconfronteerd met dit dualistisch karakter van licht. Voor een zonnecel zit een lens om het zonnelicht te concentreren op het gevoelig oppervlak van de cel. Die lens

werkt doordat het licht zich voordoet onder de vorm van golven, die afgebogen wordt door de brekingsindex van de lens. Uit die breking volgt een samenbundeling van de golven in het brandpunt van de lens. Maar als het licht op het gevoelig oppervlak van de zonnecel valt zijn het opeens de fotonen, de lichtdeeltjes, die dank zij hun energie elektronen door de sperlaag van de zonnecel kunnen schieten en daardoor een spanning over de zonnecel opbouwen! Bij het bestuderen van de werking van een zonnecel met bundellens moet men dus zowel een beroep doen op licht als golfverschijnsel als op licht als deeltjesverschijnsel!

Gevolgen
De gevolgen van de quantum mechanica op het filosofisch denken over de natuur zijn erg groot en zelfs nu nog steeds volop in discussie. Voor de dagelijkse praktijk maakt het echter niets uit. In de gehele elektrotechniek en elektronica wordt steeds gesproken over elektronen alsof dat ongelooflijk kleine knikkertjes harde stof zijn, die door geleiders en halfgeleiders stromen. Hoewel men, dank zij de quantum mechanica, nu weet dat dit een veel te eenvoudige kijk op de werkelijkheid is, kan men met deze vereenvoudigde voorstelling vrijwel alle verschijnselen verklaren. Waarom dus moeilijk doen als het ook gemakkelijk kan?
Daarmee mag echter niet gezegd worden dat de theorieën die door de quantum mechanica zijn ontwikkeld van geen belang zijn voor de elektronica. Wel integendeel! Moderne elektronische onderdelen zoals MASER's, LASER's, IC's en zelfs de ordinaire LED's zouden niet ontwikkeld zijn zonder dat de quantum mechanica de technici een grondig beeld had geschonken over hoe het interne van een atoom echt in elkaar zit. Er is zelfs een speciale tak van de natuurkunde ontwikkeld die men "de vaste-stof fysica" noemt. Deze volledig op de quantum mechanica geënte wetenschap houdt zich volledig bezig met het natuurkundig verklaren van de werking van in feite alledaagse elektronische onderdelen zoals zonnecellen, LED's, etc.

Begrenzing van deze studie
In dit deel van dit naslagwerk zullen alle verschijnselen volgens de klassieke mechanica verklaard worden. Een quantum mechanische benadering is immers absoluut onmogelijk zonder een flinke dosis wiskunde en daarmee zou dit verhaal voor vele lezers en lezeressen absoluut ontoegankelijk worden. Bovendien kan zowat alles dat tot de elektrotechniek en de elektronica hoort goed uitgelegd worden aan de hand van de wetten van de klassieke mechanica. Alleen bij het bestuderen van verschijnselen die zich in halfgeleiders voordoen, bijvoorbeeld het uitzenden van licht door een LED, schiet de klassieke mechanica te kort om het verschijnsel echt begrijpelijk te kunnen verklaren. Het zij zo!

Grootheden van de mechanica

Inleiding
De natuurkunde houdt zich bezig met het onderzoeken van verschijnselen. Dus moet men eerst een methode weten te verzinnen om deze verschijnselen van elkaar te kunnen onderscheiden. Verschijnselen worden gekenmerkt door hun grootheden. Zo heeft een willekeurig

2.2 De plaats van de elektronica in de natuurkunde

voorwerp bepaalde afmetingen, een bepaalde massa, een bepaald gewicht, een bepaalde temperatuur en misschien een bepaalde snelheid. Al die begrippen vormen de grootheden van dat voorwerp. Hoe meer grootheden men kan meten, hoe beter het voorwerp wetenschappelijk gedefinieerd wordt. Vindt men ergens anders een tweede voorwerp, waarvan de grootheden precies gelijk zijn aan deze van het eerste voorwerp, dan kan men zeggen dat beide voorwerpen identiek zijn en zich natuurkundig op dezelfde manier zullen gedragen.
In de praktijk van iedere wetenschap is het meten en definiëren van grootheden dus van fundamenteel belang. Onder het meten van een grootheid verstaat men deze grootheid vergelijken met een soortgelijke grootheid, die men tot eenheid heeft gekozen. Zo heeft men eeuwen lang voor de eenheid van afstand de lengte genomen van een bepaalde staaf metaal die in Frankrijk werd bewaard. Deze eenheid werd "de meter" genoemd.
Op deze manier was iedereen in principe in staat zijn of haar eigen eenheid van lengte te ijken op de internationale standaard, de meter.

IJkproblemen
Er bestaan uiteraard ontelbare grootheden. Alleen in de elektrotechniek kan men zonder diep na te denken meer dan tien grootheden opnoemen: lading, spanning, stroom, weerstand, capaciteit, zelfinductie, flux, frequentie, golflengte, permeabiliteit, veldsterkte, vermogen, geleidbaarheid en reluctantie. Nu hebben al deze grootheden weliswaar een eigen eenheid, zoals:
- de Ampère (A) voor stroom;
- de Ohm (Ω) voor elektrische weerstand:
- de Coulomb (Q) voor lading;
- de Henry (H) voor zelfinductie;
- de Farad (F) voor capaciteit;
- de Siemens (S) voor geleidbaarheid;
- de Watt (W) voor vermogen;

maar het is in de praktijk een vrijwel onmogelijke klus om voor al deze eenheden internationale standaarden af te spreken. Men komt dan tot onpraktische ijkdefinities zoals:
- een weerstand van 1 Ω is gelijk aan de weerstand van een kolom kwik van 1062,6 mm lengte, 1 mm^2 doorsnede bij een temperatuur van 0° C;
- een lading van 1 Q doet 0,0104 mg waterstofgas in een voltameter vrijkomen.

Fundamentele grootheden
Dank zij de wiskunde hoeft men echter niet iedere eenheid van iedere grootheid te ijken. Men heeft kunnen aantonen dat er slechts vijf fundamentele grootheden bestaan, waaruit alle overige grootheden wiskundig afgeleid kunnen worden:
- de lengte met als eenheid de **m**eter (m);
- de massa met als eenheid de **k**ilogram (kg);
- de tijd met als eenheid de **s**econde (s);
- de elektrische stroom met als eenheid de ampère (A);
- de temperatuur met als eenheid de graad kelvin (°K).

Het internationale eenhedenstelsel dat van deze vijf basiseenheden is afgeleid noemt men dan ook het MKS-stelsel, naar de eerste letters van de drie oudste fundamentele eenheden meter, kilogram en seconde. In de techniek wordt hiervoor vaak het woord Giorgi-stelsel gebruikt.
De ijkwaarden van de vijf basis-eenheden worden tegenwoordig als volgt gedefinieerd:

- de seconde is de duur van 9.192.631 perioden van de straling die wordt uitgezonden tussen twee bepaalde energieniveaus van een atoom $Cesium_{133}$;
- de meter is gelijk aan de afstand welke het licht aflegt in $^1/_{299.792.458}$-ste deel van een seconde;
- de kilogram is de massa van een bepaalde cylinder, gemaakt van platina-irridium, die wordt bewaard te Sèvres in Frankrijk.
- de ampère is de stroom die door twee 1 m van elkaar verwijderde parallelle draden vloeit en die tussen de draden een aantrekkingskracht van $2x10^{-7}$ newton per meter lengte veroorzaakt;
- de graad kelvin is het $^1/_{273,16}$-de deel van de tripel-temperatuur van zuiver water.

Het valt op dat de vijf basis-eenheden nu niet precies op de allergemakkelijkste manier zijn gedefinieerd. Dat heeft historische achtergronden. De vijf fundamentele grootheden zijn al eeuwen lang bekend. De eenheden werden in die tijd vrij willekeurig toegekend, zo goed als dat kon met de toen ter beschikking staande meettechnieken. Bij het herdefiniëren van deze eenheden in het internationale eenhedenstelsel was het natuurlijk zaak definities te vinden die technisch goed reproduceerbaar zijn maar die bovendien precies dezelfde waarden opleverden als de oude definities.

Het zou natuurlijk beter zijn geweest om vijf geheel nieuwe definities op te stellen, die veel eenvoudiger zijn. Maar dat zou tot gevolg hebben dat men overal in de wereld alle natuurkundige grootheden opnieuw zou moeten omrekenen met de nieuwe ijkwaarden van hun eenheden als basis. Wie weet hoeveel moeite het kost om de Angelsaksische wereld te laten omschakelen van hun vreemdsoortige lengte-eenheden naar de meter, weet ook dat het wereldwijd volledig omschakelen naar allemaal nieuwe eenheden een onmogelijke taak is! Men zal het dus met deze vreemdsoortige definities moeten doen.

Symbolen van grootheden

Naast eenheden hebben grootheden ook nog symbolen. Dat zijn de afkortingen, waarmee zij in wiskundige formules worden voorgesteld. De vijf fundamentele grootheden hebben de onderstaande symbolen:
- lengte: s
- massa: m
- tijd: t
- elektrische stroom: I
- temperatuur: T

Afgeleide grootheden

Alle andere grootheden noemt men afgeleide grootheden, omdat zij uit een combinatie van de fundamentele grootheden kunnen worden afgeleidt. Zo kan men berekenen dat de praktische eenheid van elektrische spanning, de aan iedere elektronicus zeer bekende volt, ook uitgedrukt kan worden als:

$1 V = 1 kg.m^2/A.s^3$

Hoe men daarbij komt? Dat zal, stapje na stapje, duidelijk worden in de volgende hoofdstukken, waarin de definities worden uitgelegd van zaken zoals "elektrisch potentiaal", "elektrische arbeid" en "elektrische lading". Want uit die drie basisgrootheden van de elektrotechniek kan men afleiden wat een elektrische spanning nu precies natuurkundig voorstelt.

Voorvoegsels

De meeste eenheden zijn voor de dagelijkse praktijk of veel te groot of veel te klein gedefinieerd. Zo zal wel geen enkele elektronicus een condensator van 1 F in huis

hebben! Nu zou men dus de waarde van een heel praktisch condensatortje in een afstemkring kunnen schrijven als 0,000.000.000.047 F. Dat is vrij onhandig en vandaar heeft men dertien zogenoemde voorvoegsels ingevoerd, waarmee men de waarde van een eenheid kan vermenigvuldigen.
Van groot naar klein zijn deze voorvoegsels:

- de tera, afgekort T, met als waarde biljoen maal, dus 10^{12} of 1.000.000.000.000;
- de giga, afgekort G, met als waarde miljard maal, dus 10^9 of 1.000.000.000;
- de mega, afgekort M, met als waarde miljoen maal, dus 10^6 of 1.000.000;
- de kilo, afgekort k, met als waarde duizend maal, dus 10^3 of 1.000;
- de hecto, afgekort h, met als waarde honderd maal, dus 10^2 of 100;
- de deca, afgekort D, met als waarde tien maal, dus 10^1 of 10;
- de deci afgekort d, met als waarde een tiende maal, dus 10^{-1} of 0,1;
- de centi, afgekort c, met als waarde een honderdste maal, dus 10^{-2} of 0,01;
- de milli, afgekort m, met als waarde een duizendste maal, dus 10^{-3} of 0,001;
- de micro, afgekort µ, met als waarde een miljoenste maal, dus 10^{-6} of 0,000.001;
- de nano, afgekort n, met als waarde een miljardste maal, dus 10^{-9} of 0,000.000.001;
- de pico, afgekort p, met als waarde een biljoenste maal, dus 10^{-12} of 0,000.000.000.001;
- de femto, afgekort f, met als waarde een duizend-biljoenste maal, dus 10^{-15} of 0,000.000.000.000.001.

Op deze manier kan de reeds voorgestelde condensator heel eenvoudig geschreven worden als 47 pF!

Mechanische begrippen

Inleiding
Omdat de elektronica een onderdeel vormt van de algemene mechanica, treft men in beide disciplines gelijksoortige begrippen aan. "Vermogen" is een grootheid die heel bekend is in de elektronica, maar in wezen uit de algemene mechanica stamt. Hetzelfde geldt voor grootheden zoals "arbeid", "kracht" en "energie". Ook het moeilijke begrip "veld" werd het eerst in de algemene mechanica gedefinieerd en in een later stadium overgenomen in de elektrotechniek. Wie elektronica wil begrijpen, moet dus eerst enig inzicht hebben in de natuurkundige betekenis van dergelijke algemene mechanische begrippen.

Het begrip massa
De massa, met als symbool dus m, van een voorwerp wordt door leken vaak verward met het gewicht van dat voorwerp. Toch zijn dat twee heel verschillende grootheden. Iedereen weet dat een mens, die in de ruimte in een capsule zit, gewichtloos is. Toch heeft deze ruimtereiziger wel degelijk massa! Massa wordt in de mechanica omschreven als een hoeveelheid materie, bepaalt door de dichtheid ervan en de omvang. De omvang hangt uiteraard af van de afmetingen.
De dichtheid is afhankelijk van het soort atomen of sub-atomaire deeltjes, waaruit de materie is samengesteld. Er bestaan namelijk lichte atomen, zoals bijvoorbeeld waterstof maar ook zware atomen, zoals bijvoorbeeld lood. Een blok lood heeft een veel grotere massa dan een wolk waterstofgas met dezelfde omvang.
Hier op aarde uit de massa van een voorwerp zich onder de vorm van het gewicht.

2.2 De plaats van de elektronica in de natuurkunde

Het gewicht is echter een kracht, die op de massa wordt uitgeoefend door de aantrekkingskracht van de aarde. Vandaar dat voorwerpen ver weg in de ruimte, waar het effect van de aantrekkingskracht van de aarde verwaarloosbaar klein is, wél massa, maar géén gewicht hebben!

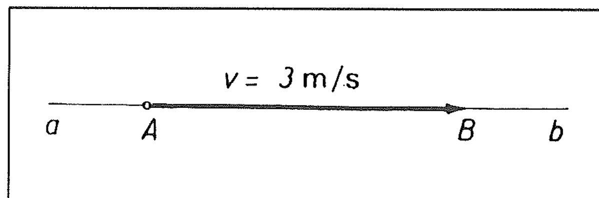
Het begrip snelheid
Onder snelheid, met als symbool v, verstaat men de weg die een voorwerp in beweging aflegt per tijdseenheid.
Of:
snelheid = afgelegde weg gedeeld door tijd.
Onder de vorm van een formule is snelheid dus te omschrijven als:

$v = s/t$

De eenheid van snelheid volgt uit deze formule als m/s of, in woorden, meter per seconde.

Scalaire en vectoriële grootheden
Over de grootheid snelheid moet een belangrijke opmerking worden gemaakt. De tot nu toe behandelde grootheden zoals massa, temperatuur en tijd kunnen volledig gedefinieerd worden door hun waarde en hun eenheid. Als men zegt dat een bepaald lichaam een massa van 1,24 kg heeft, dan is de massa van dat lichaam daardoor volledig vastgelegd. Grootheden die alleen door hun waarde gedefinieerd worden noemt men "scalaire" grootheden.

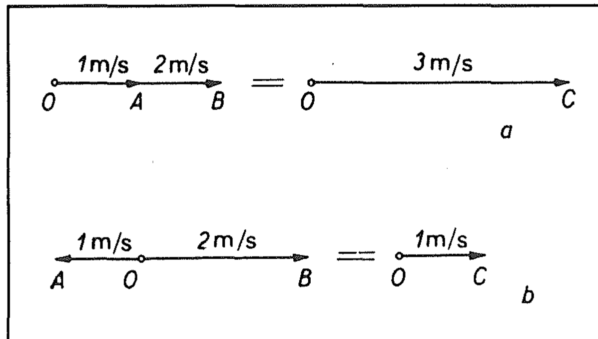
Met snelheden ligt dat anders. Snelheden hebben namelijk niet alleen een waarde in m/s, maar ook een richting waarin zij werken! Bovendien hebben zij een aangrijpingspunt en een zin. Elke grootheid die wordt gedefinieerd door een waarde, een richting, een zin en een aangrijpingspunt noemt men een "vectoriële" grootheid. Een vector-grootheid wordt voorgesteld door een pijl, waarvan de lengte de waarde van de grootheid geeft. De pijl geeft de zin van de grootheid en de richting van de pijl de richting waarin de grootheid werkt. Het niet van een pijlpunt voorziene uiteinde van de pijl geeft het aangrijpingspunt.
Een en ander is voorgesteld in figuur 3/2.2-3.



Figuur 3/2.2-3: De voorstelling van een vectoriële grootheid, zoals een snelheid.

In de figuur is punt A het aangrijpingspunt van de snelheidsvector. De lengte AB geeft de waarde van de vectoriële grootheid, de pijlpunt geeft de zin aan (van links naar rechts) en de lijn ab de richting (in dit geval horizontaal).
Vectoriële grootheden komt men ook in de elektronica vaak tegen. Vandaar dat het noodzakelijk is even verder in te gaan op de manier waarop men met vectoren moet rekenen.
Een van de belangrijkste bewerkingen die men op vectoren moet uitvoeren is twee vectoren bij elkaar optellen. Dat gaat niet zo gemakkelijk als bij scalaire grootheden! De som van twee vectoren is een nieuwe vector, die men de resultante noemt.
Als de twee vectoren hetzelfde aangrijpingspunt en dezelfde richting hebben, dan is er geen probleem. In figuur 3/2.2-4 is geschetst hoe te handelen.

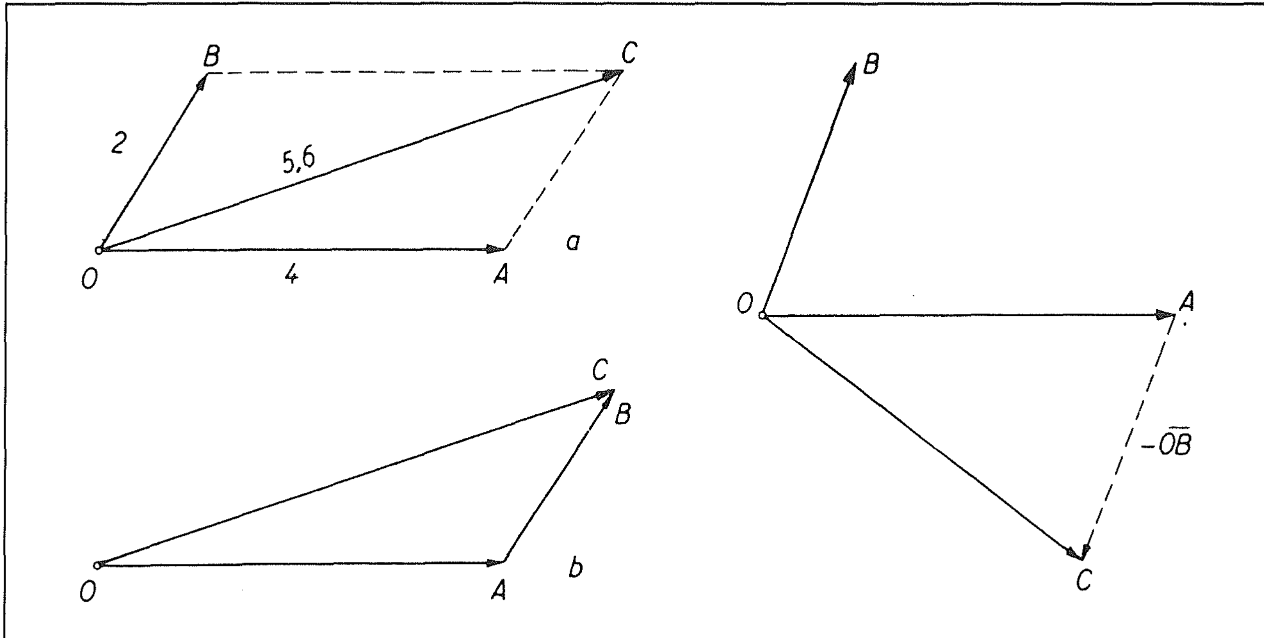
2.2 De plaats van de elektronica in de natuurkunde



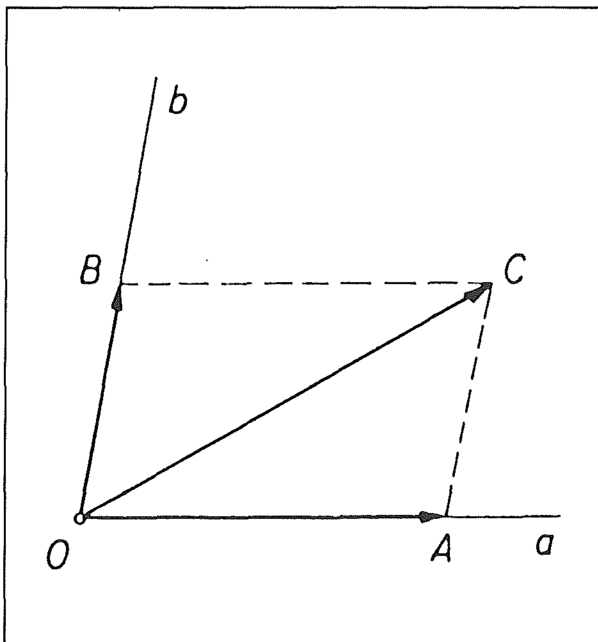
Figuur 3/2.2-4: Het optellen van vectoren die in elkaars verlengde liggen.

In figuur a werken twee snelheidsvectoren A en B in op het aangrijpingspunt O. Beide vectoren hebben dezelfde richting en dezelfde zin. De ene vector is 1 m/s groot, de andere 2 m/s. De resultante heeft een waarde van 3 m/s en uiteraard dezelfde richting en zin.
In figuur b is getekend wat er gebeurt als beide vectoren een tegengestelde zin hebben. De vector A werkt men 1 m/s naar links, de vector B met 2 m/s naar rechts. De resultante is een vector met een waarde van 1 m/s, die naar rechts werkt.
Tot nu toe tamelijk eenvoudig, dus! Het wordt echter iets moeilijker als de twee vectoren in verschillende richtingen aangrijpen. Dit is getekend in figuur 3/2.2-5a. In het aangrijpingspunt O werken twee snelheidsvectoren in. De eerste A heeft een horizontale richting en een grootte van 4 m/s. De tweede B staat onder een hoek van ongeveer 60° naar boven en heeft een grootte van 2 m/s. De resultante kan meetkundig geconstrueerd worden, door met de vectoren A en B als zijden een parallellogram te tekenen. De resultante C is dan gelijk aan de diagonaal die vertrekt uit het aangrijpingspunt O. Met simpele wiskundige middelen kan men berekenen dat de waarde van de resultante gelijk is aan 5,6 m/s. Men kan dit voorbeeld vertalen naar een praktische situatie. Stel dat in een weiland op een plek O een zwaar rotsblok ligt. Men wil dit rotsblok verplaatsen en spant door middel van twee stevige touwen twee tractoren in, die beide aan het blok gaan trekken. De ene tractor A vertrekt in horizontale richting met een snelheid van 4 m/s. De tweede tractor B trekt onder een hoek van 60° met een snelheid van 2 m/s. Dank zij de vector-wiskunde kan men nu berekenen in welke richting en met wat voor snelheid het rotsblok wordt verplaatst. De snelheid van het blok bedraagt 5,6 m/s, de richting is naar C. In figuur 3/2.2-5b is een eenvoudiger manier getekend om de resultante te berekenen. Men kan in de top van vector A vector B tekenen. Wel moet men deze vector onder precies dezelfde hoek tekenen als de originele vector. De resultante C is nu de derde zijde van de driehoek OAB. Als men vector B van vector A zou moeten aftrekken, moet men in de top van vector A vector B in tegengestelde zin tekenen, zie figuur c. De resultante C ontstaat weer door de driehoek OAC te sluiten. Een tweede belangrijke bewerking die men op vectoriële grootheden kan uitvoeren is het ontbinden in twee deelvectoren langs twee gegeven richtingen. Dit wordt toegelicht aan de hand van figuur 3/2.2-6. In deze figuur is een vector C getekend, die in een bepaalde richting aangrijpt in punt O. Deze vector kan ontbonden worden in twee componentvectoren A en B, die verlopen volgens de richtingen a en b. Het volstaat weer een parallellogram te tekenen, waarbij de vector C de diagonaal vormt en de twee component-vectoren A en B de twee aansluitende zijden. Zoals later zal blijken kan men door het ontbinden van vectoren in een horizontale en vertikale component ingewikkelde vectorberekeningen ten zeerste vereenvoudigen.

2.2 De plaats van de elektronica in de natuurkunde



Figuur 3/2.2-5: Het optellen van twee vectoren die een hoek met elkaar maken.



Figuur 3/2.2-6: Het ontbinden van een vectoriële grootheid volgens twee richtingen.

Er zijn nog heel wat meer rekenregels van toepassing op vectorgrootheden. Met de vier simpele voorbeeldjes die hier gegeven zijn, kan men echter alle vectorproblemen oplossen, die in de loop van deze studie zullen voorkomen!

Het begrip versnelling
De versnelling, met als symbool a, van een voorwerp is de mate van toename of afname van de snelheid per tijdseenheid.
Of:
versnelling = snelheid gedeeld door tijd.
Wiskundig kan dit geschreven worden als:

a = v/t

De eenheid van versnelling is dus $^{m/s}/_{s}$ is m/s^2, meter per seconde kwadraat.

Het begrip kracht
Het begrip kracht, met als symbool F, is een belangrijke grootheid in de mechanica. Ook in de elektrotechniek wordt voortdurend met krachten gewerkt. Men weet bijvoorbeeld dat in de beeldbuis van een oscilloscoop de elektronen worden afgebogen over het scherm doordat er een kracht op wordt uitgeoefend.

2.2 De plaats van de elektronica in de natuurkunde

Maar wat is nu precies een kracht? Volgens de mechanica is kracht ieder *uitwendig* verschijnsel, dat de oorzaak is van een bewegingsverandering van een lichaam. Als een knikker in rust is en die knikker gaat plotseling over de tafel rollen, dan kan dit alleen doordat er een uitwendige kracht is op uitgeoefend. Als een rollende knikker opeens sneller of trager gaat rollen, of van richting verandert is ook dat een teken dat op de knikker een kracht is uitgeoefend.
Newton is de man die het begrip kracht wiskundig heeft kunnen definiëren. De kracht die op een voorwerp wordt uitgeoefend is gelijk aan het product van de massa m van het voorwerp en de versnelling a die het gevolg is van de kracht. Dat is vrij logisch. Het zal duidelijk zijn dat op een zwaarder lichaam een grotere kracht moet worden uitgeoefend om dezelfde versnelling tot gevolg te hebben.
Wiskundig is kracht dus gelijk aan:

$$F = m \cdot a$$

De eenheid van kracht is bijgevolg $kg.m/s^2$. Deze eenheid wordt tegenwoordig de Newton, met als afkorting N genoemd.
Ook de kracht is een vectoriële grootheid. Krachten kunnen immers in alle mogelijke richtingen op een voorwerp inwerken. De versnelling die daarvan het gevolg is zal het voorwerp in de richting van de vector van de kracht laten bewegen.

Het begrip veld

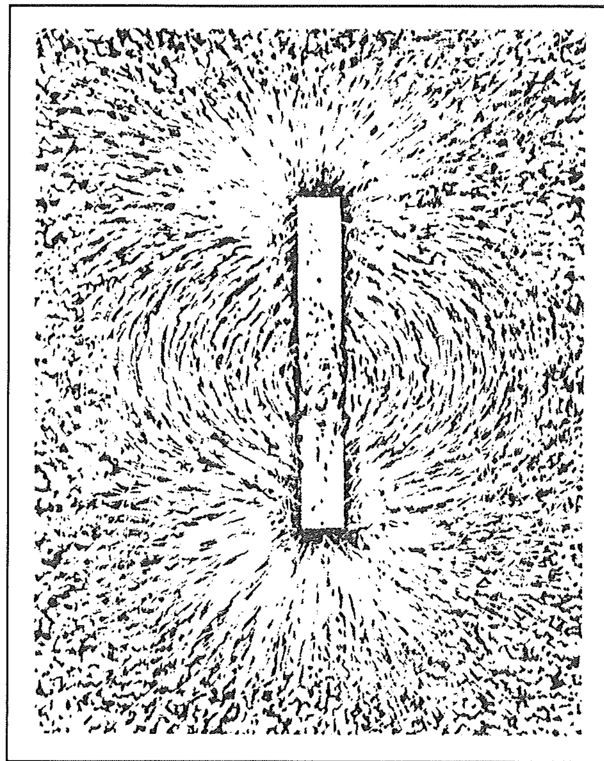
Iedere elektronicus neemt het woord veld nogal vaak in de mond. Men kent immers elektrische velden en magnetische velden. In de klassieke mechanica kent men bovendien het begrip aantrekkingsveld, ook wel gravitatie veld genoemd. Maar wat moet men zich nu bij zo'n veld voorstellen? Dat is een beetje moeilijk te omschrijven. Newton stelde dat voorwerpen elkaar aantrekken en dat hierdoor verklaard kan worden waarom voorwerpen naar het oppervlak van de aarde vallen en de aarde rond de zon blijft draaien. Maar als voorwerpen elkaar aantrekken, dan betekent dit dat zij elkaars beweging willen beïnvloeden en dus krachten op elkaar uitoefenen. Maar hoe was nu te begrijpen dat er in de lege ruimte tussen de zon en de aarde krachten zouden kunnen voorkomen? Men noemde dit "kracht op afstand". Om dit enigszins te kunnen verklaren werd het begrip "veld" ingevoerd. Het veld moest worden opgevat als dat deel van de ruimte, waarin een bepaalde kracht zich kon manifesteren. Rond de zon zit dus een zwaartekracht- of gravitatie veld, voorwerpen die in dit veld aanwezig zijn ondervinden de aantrekkende kracht van de zon. Over hoe dat veld er zou moeten uitzien kon men zich in die tijd niets voorstellen.
In de elektrotechniek doen zich vergelijkbare verschijnselen voor. Als men een sterke staafmagneet op een tafel bevestigt en nadien een ijzeren voorwerp in de buurt van de magneet brengt, dan voelt men heel duidelijk dat dit voorwerp wordt aangetrokken door de magneet. Het ijzeren voorwerp wil zich naar de magneet verplaatsen. Dat is dus een bewegingsverandering en volgens de definitie van kracht kan dit alleen veroorzaakt worden doordat de magneet kracht uitoefent op het voorwerp. Ook dit is dus een uiting van "kracht op afstand". Omdat natuurkundigen gelijksoortige verschijnselen altijd onder een en hetzelfde begrip willen samenvatten werd die magnetische kracht op afstand toegeschreven aan "het magnetisch veld". Dit veld is rond de staafmag-

2.2 De plaats van de elektronica in de natuurkunde

neet aanwezig en heeft tot gevolg dat ijzeren voorwerpen, die in dit veld geplaatst worden, de aantrekkende kracht van de magneet ondergaan. Het vreemde is nu dat dit magnetisch veld op een heel eenvoudige manier zichtbaar te maken is. Als men een staafmagneet onder een vel stijf papier legt en men strooit voorzichtig heel fijn ijzervijlsel op dit papier, dat stelt men vast dat de korreltjes ijzer zich volgens een bepaald patroon schikken. Dit is getekend in figuur 3/2.2-7.

Dit patroon is de typische verschijningsvorm van het magnetisch veld rond de staafmagneet. De duidelijk herkenbare lijnen in het patroon noemt men de "veld- of krachtlijnen" van het magnetisch veld. Wat dat veld nu precies is weet men niet. Het is in ieder geval geen eigenschap van de tussenstof. Ook als men de magneet in een afgesloten ruimte zet en deze ruimte volledig luchtledig pompt zullen de ijzerdeeltjes zich op dezelfde manier schikken. Het veld is dus een fundamentele natuurkundige eigenschap van de lege ruimte en daar moeten wij mensen met ons beperkt voorstellingsvermogen het mee doen.
Velden kunnen elkaar beïnvloeden. Als men twee identieke staafmagneten op een kleine afstand van elkaar op een tafel fixeert en nadien het experiment herhaalt, dan ziet men dat de twee magnetische velden elkaars aanwezigheid "voelen" en op elkaar inwerken.
De twee mogelijkheden zijn getekend in figuur 3/2.2-8.

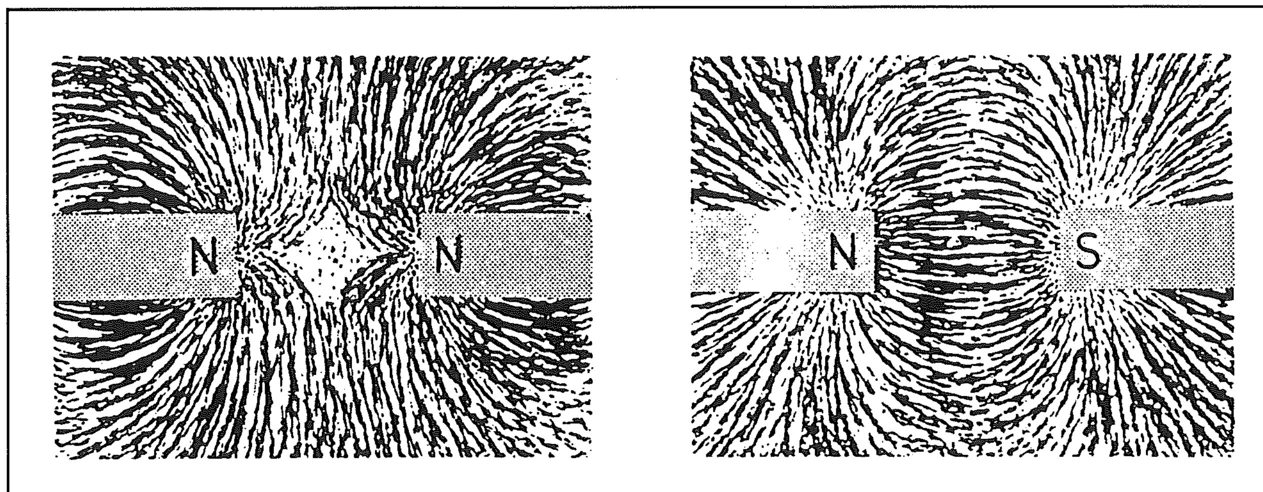
Als men de twee staafmagneten met de noordpolen tegen elkaar zet (links), dan blijkt duidelijk dat de twee magnetische velden elkaar afstoten. De veldlijnen "duwen" tegen elkaar, waardoor de afstotende kracht van gelijknamige magnetische polen wordt verklaard. Zet men echter de noordpool van de ene magneet tegen de zuidpool van de andere (rechts), dan vloeien de twee velden in elkaar over. Hierdoor wordt de aantrekkende kracht tussen niet gelijknamige magnetische polen verklaard.



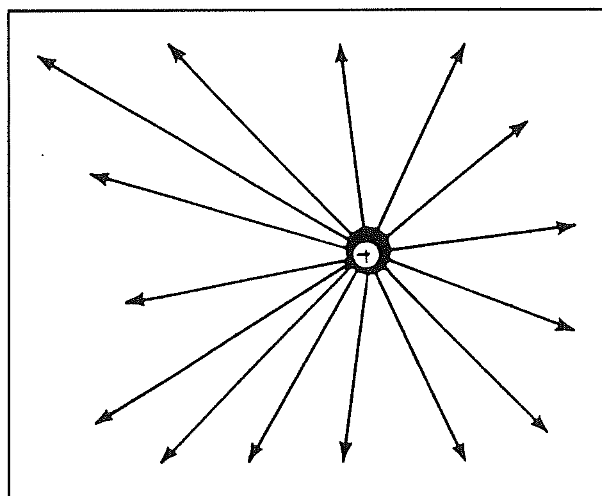
Figuur 3/2.2-7: Het magnetisch veld dat rond een staafmagneet aanwezig is.

Naast het gravitatie veld en het magnetisch veld bestaat er nog een derde fundamenteel natuurkundig veld: het elektrisch veld. Het was al lang bekend dat elektrisch geladen voorwerpen in staat zijn andere voorwerpen aan te trekken. Ook dit is een "kracht op afstand" en wordt dus verklaard door de aanwezigheid van een elektrisch veld in de lege ruimte. Men is in staat (zij het niet zo gemakkelijk als bij een magnetisch veld) ook dit elektrisch veld zichtbaar te maken.

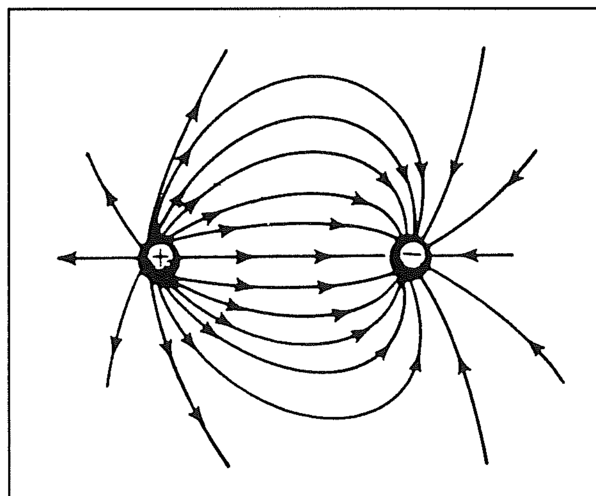
2.2 De plaats van de elektronica in de natuurkunde



Figuur 3/2.2-8: Magnetische velden kunnen elkaar beïnvloeden.



Figuur 3/2.2-9: Het elektrisch veld rondom een puntlading.

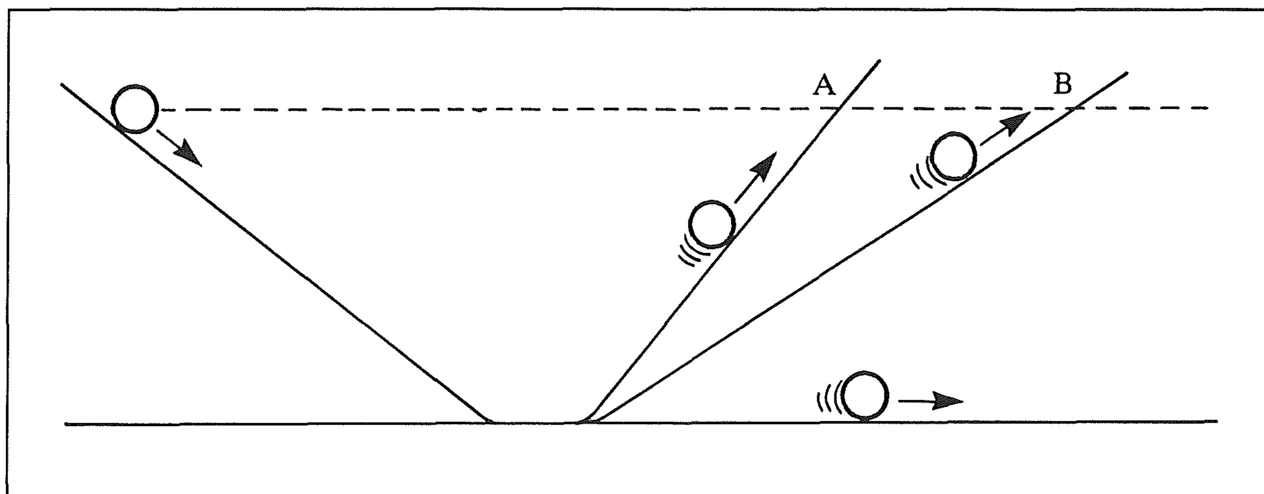


Figuur 3/2.2-10: Het radiale veld rond een positieve puntlading en het radiale veld rond een negatieve puntlading verenigen zich tot één samengesteld elektrisch veld.

Laadt men een kleine massa heel sterk elektrisch op, dan ontstaat een zogenoemde "puntlading". Rond deze puntlading is een elektrisch veld aanwezig, waarvan de krachtlijnen verlopen zoals getekend in figuur 3/2.2-9. De elektrische krachtlijnen verlopen dus radiaal, dat betekent dat zij ontspruiten uit het middelpunt van de puntlading en zich volgens de richting van de stralen van het kleine bolletje in alle richtingen door de ruimte verspreiden.

Ook elektrische velden beïnvloeden elkaar. Zet men bijvoorbeeld een positief opgeladen puntlading in de buurt van een negatief opgeladen puntlading, dan ontstaat een verenigd elektrisch veld, zoals getekend in figuur 3/2.2-10.
Uit dit verschijnsel kan verklaard worden waarom positief en negatief geladen voorwerpen elkaar aantrekken.

2.2 De plaats van de elektronica in de natuurkunde



Figuur 3/2.2-11: Het experiment van Galilei, waarmee het begrip "energie" mechanisch werd gedefinieerd.

Het begrip arbeid
Arbeid, met als symbool W, ontstaat wanneer een kracht een voorwerp verplaatst in dezelfde richting waarin de kracht op het voorwerp wordt uitgeoefend. De hoeveelheid arbeid is zowel afhankelijk van de grootte van de kracht als van de afstand van de verplaatsing.
Wiskundig kan men dus arbeid beschrijven als:

W = F . s

De eenheid van arbeid is bijgevolg Nm (Newton-meter), hetgeen in het dagelijkse spraakgebruik de J (Joule) wordt genoemd.

Het begrip energie
De "Gemeentelijke Energiebedrijven" leveren ieder huishouden "elektrische energie".
Het begrip energie is dus een woord dat gemeengoed is geworden in het dagelijkse spraakgebruik. Ook in de elektronica wordt vaak over energie gesproken. Zo wordt in een zonnecel energie, die opgesloten zit in de straling van de zon, omgezet in elektrische energie.

Maar wat in nu in feite energie en hoe kan men dit begrip wetenschappelijk definiëren? Om dat te begrijpen moet men terug naar het jaar 1630, toen Galilei zijn beroemde experimenten uitvoerde met rollende kogels. Het experiment is geschetst in figuur 3/2.2-11.

Galilei liet een zware loden kogel van het linker hellend vlak rollen. Nadien moest de kogel weer tegen een tweede hellend vlak oprollen, waarvan de hoek verstelbaar was. Galilei stelde vast dat de hoogte A of B, die de kogel bereikte, volledig onafhankelijk was van de helling van het tweede hellend vlak. In beide gevallen kwam de kogel tot de hoogte waarop hij op het linker vlak was losgelaten. Op de een of andere manier "weet" de kogel dus vanaf welke hoogte hij werd losgelaten. Er blijft dus "iets" in de kogel behouden. Dat "iets" noemt men de energie die in de kogel ligt besloten op het moment dat hij wordt losgelaten. Die energie is er verantwoordelijk voor dat de kogel gaat rollen en dus arbeid verricht.
Volgens de wetten van de mechanica wordt energie dan ook gedefinieerd als de geschiktheid van een voorwerp om op een

2.2 De plaats van de elektronica in de natuurkunde

bepaald moment, onder gunstige omstandigheden, arbeid te leveren. Als zonlicht op het materiaal van een zonnecel valt, dan is de energie die in het licht ligt besloten in staat elektronen uit hun atoomverband te stoten. De elektronen verplaatsen zich onder invloed van een kracht, er wordt dus arbeid verricht. Die arbeid is het gevolg van de energie die in het zonlicht zit.
Energie kan zich onder allerlei vormen uiten. Enige van de belangrijkste energie-uitingen worden nu in het kort besproken.

- Thermische energie
  Een van de belangrijkste uitingen van energie is warmte. Dit noemt men "thermische energie". Dat de energie van de zonnestraling daartoe in staat is zal wel duidelijk zijn!
- Mechanische energie
  De kogel in het experiment van Galilei heeft "mechanische energie". Als men de kogel naar zijn startpositie rolt moet men arbeid verrichten. Men oefent immers een kracht op de kogel uit, met als gevolg dat de kogel in de richting van de kracht gaat bewegen. Die arbeid wordt overgedragen op de kogel en geeft hem zijn mechanische energie.
  Het zal duidelijk zijn dat de mechanische energie van de kogel toeneemt als men hem hoger op het hellend vlak plaatst. Als de kogel in rust is in zijn uitgangspositie noemt men de energie die er in aanwezig is "potentiële energie". Laat men de kogel los, zodat hij naar beneden rolt, dan wordt de potentiële energie omgezet in "kinetische energie". Deze mechanische energie uit zich in de snelheid van de rollende kogel. Hoe sneller de kogel rolt, hoe meer kinetische energie er in de kogel aanwezig is.
- Elektrische energie
  Uit de verklaring van het elektrisch veld volgt dat dit veld voorwerpen die in het veld aanwezig zijn kan aantrekken. Er wordt dus een kracht op het voorwerp uitgeoefend met als gevolg dat het voorwerp in de richting van de kracht gaat bewegen. Er wordt arbeid verricht! Vandaar dat men zegt dat in een elektrisch veld "elektrische energie" aanwezig is. Het veld is in staat arbeid te verrichten. Dit is een zeer belangrijke definitie, want hieruit zal in een van de volgende hoofdstukken het begrip "elektrisch potentiaal" afgeleid kunnen worden!
- Magnetische energie
  Het zal nu wel zonder nadere toelichting duidelijk zijn dat ook in een magnetisch veld energie aanwezig is, die "magnetische energie" wordt genoemd.
- Chemische energie
  Als men in een ballon een mengsel van benzinedamp en zuurstof brengt, gebeurt er verder niets. Brengt men nu echter een klein vonkje in dit mengsel, dan zal de ballon ontploffen, waarbij warmte vrij komt. Die warmte is thermische energie en die moet ergens vandaan komen. Men zegt dan ook dat in het gasmengsel "chemische energie" aanwezig is.

Omdat energie de geschiktheid van een voorwerp is om arbeid te verrichten zijn de eenheid en het symbool van energie gelijk aan deze van arbeid: de Joule en W. Soms gebruikt men echter E als het symbool voor energie.

Een belangrijke, zelfs zeer fundamentele wet uit de mechanica stelt dat energie niet verloren kan gaan.

2.2 De plaats van de elektronica in de natuurkunde

GROOTHEID	SYMBOOL	EENHEID	AFKORTING	DEFINITIE
lengte	s	meter	m	
massa	m	kilogram	kg	
tijd	t	seconde	s	
elektrische stroom	I	ampère	A	wordt later gegeven
temperatuur	T	graad kelvin	°K	
snelheid	v	meter per seconde	m/s	
versnelling	a	meter per seconde kwadraat	m/s^2	
kracht	F	newton	N	$1\ N = 1\ kgm/s^2$
arbeid	W	joule	J	1 J = 1 Nm
energie	W, E	joule	J	1 J = 1 Nm
vermogen	P	watt	W	1 W = 1 J/s 1 W = 1 Nm/s

Figuur 3/2.2-12: Een overzicht van alle in dit hoofdstuk behandelde grootheden met hun definities.

Dit wordt "de wet van het behoud van energie" genoemd. Energie kan zich wél van de ene uitingsvorm in een andere omzetten.
Chemische energie die in een gasmengsel aanwezig is, kan vrij gemakkelijk in thermische energie worden omgezet. De totale hoeveelheid van energie gaat echter niet verloren!
Wel is het zo dat men "hoogwaardige" en "laagwaardige" vormen van energie heeft ontdekt. Energie zet zich vrij gemakkelijk om van een hoogwaardige naar een laagwaardige toestand. Omgekeerd is echter nauwelijks mogelijk.
Het is dan ook fout om te stellen dat de energiecrisis wordt veroorzaakt doordat de mensheid de aanwezige energie op

aarde verbruikt. Energie kan niet verbruikt worden! Beter is om te stellen dat de mensheid in korte tijd bezig is vormen van hoogwaardige energie (chemische energie in steenkool, aardolie en aardgas) om te zetten in zeer laagwaardige energie, namelijk thermische energie.

Het begrip vermogen
Alweer een begrip dat in de elektronica voortdurend gebruikt wordt. Men spreekt immers van schakelingen die een bepaald vermogen moeten kunnen leveren en weerstanden die een bepaald vermogen moeten kunnen dissiperen.
Volgens de mechanica is vermogen, met als symbool P, niets anders dan de arbeid, die per eenheid van tijd geleverd wordt.

Wiskundig:

$$\mathbf{P = W/t}$$

De eenheid van vermogen is dus J/s (Joule per seconde), hetgeen wordt afgekort tot W (Watt).

Overzicht

Tot slot van dit hoofdstuk wordt in de tabel van figuur 3/2.2-12 een overzicht gegeven van alle behandelde mechanische grootheden, hun symbolen in formules, hun eenheden, de afkorting van de eenheden en eventuele mechanische definities.

2.2 De plaats van de elektronica in de natuurkunde

3/2.3

Een kort historisch overzicht

Inleiding
De geschiedenis van de elektriciteit en het magnetisme kent tientallen beroemde namen die evenveel beroemde ontdekkingen en uitvindingen op hun naam hebben geschreven.
Wie een "kort historisch overzicht" wil samenstellen ontkomt dus niet aan een selectie.
In dit hoofdstuk wordt vandaar alleen de historische weg beschreven, die geleid heeft tot de ontdekking en de definiëring van de basiskenmerken van elektriciteit en magnetisme: lading, stroom, spanning, veld, capaciteit en weerstand. In de volgende hoofdstukken uit dit subdeel zullen andere ontdekkers op de juiste plaats de eer krijgen die hen toekomt.

De allereerste waarnemingen
Men kan zonder meer stellen dat de mensheid vanaf haar ontstaan onbewust is geconfronteerd met elektrische verschijnselen.
De bliksem is immers niets anders dan een immens grote elektrische ontlading. Maar uiteraard had men toen niet de minste notie van de natuurkundige achtergronden van dit verschijnsel. Ook het zogenoemde "Sint Elmusvuur", een elektrische puntontlading van voorwerpen die door luchtwrijving worden opgeladen, was al aan de eerste schippers bekend. Maar ook dat verschijnsel werd eerder aan de Goden dan aan natuurkundige wetten toegeschreven.

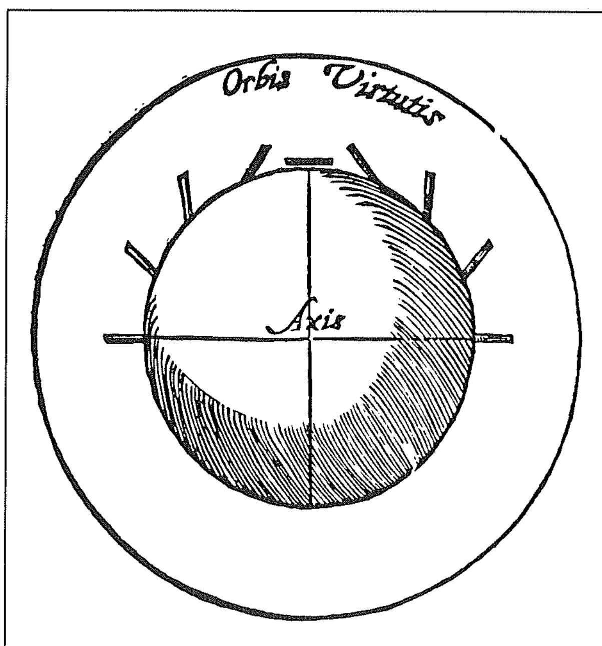
Magnetisme en de oude Grieken
De oude Grieken hebben de eerst bewaard gebleven notities achtergelaten over magnetisme. In de streek Magnesia in Klein-Azië werd een mineraal gevonden, dat vreemdsoortige eigenschappen had. Dit mineraal werd "magnetiet" genoemd. Een klomp van dit mineraal was in staat kleine stukjes ijzer aan te trekken. Als uit dit mineraal een staaf werd vervaardigd en deze staaf werd vrij opgehangen aan een touwtje, dan bleek de staaf steeds naar een welbepaalde stand te draaien en in die stand in rust te komen. Magnetiet werd "richtende steen" genoemd, omdat men dank zij dit wonderbaarlijke mineraal steeds de richting van het noorden kon opzoeken. Toch schijnen de oude Grieken dit mineraal niet gebruikt te hebben bij hun scheepvaart.

Thales van Milete
De eerste historisch gestaafde waarnemingen van elektrische verschijnselen gaan terug tot ongeveer 600 jaar voor Christus. De Griekse wiskundige Thales van Milete deed toen proefjes, waaruit bleek dat een bepaalde in de natuur voorkomende steen, "electrum" genoemd, kleine voorwerpen zoals twijgjes en grassprietjes kon aantrekken als de steen eerst stevig was

gewreven. Deze vreemde verschijnselen werden daarom "electrium" genoemd en het zal duidelijk zijn dat het hedendaagse woord "elektriciteit" hiervan werd afgeleid. Electrum is het oud-Griekse woord voor barnsteen.

Peter Perginus

De kruisvaarder Perginus schijnt de man te zijn die (althans in onze westerse beschaving) de kompasnaald heeft uitgevonden. In de dertiende eeuw ontdekte hij dat een metalen naald gemagnetiseerd kon worden door deze herhaaldelijk langs een brok magnetiet te strijken. Hij plaatste deze draaibare naald nadien op verschillende plaatsen rond een bolvormig brok magnetiet en ontdekte dat de naald steeds in een andere richting ging staan (figuur 3/2.3-1).



Figuur 3/2.3-1: De proeven met een bolvormig stuk magnetiet van Peter Perginus.

Op twee tegenover elkaar liggende punten bleef de naald loodrecht staan op het boloppervlak. Hij noemde deze punten "de polen". Perginus ontdekte verder dat als men een staaf magnetiet in twee stukken brak deze stukken dezelfde eigenschappen hadden als de oorspronkelijke staaf. Door experimenten met vrij draaibare staven magnetiet ontdekte Perginus dat twee staven magnetiet elkaar konden aantrekken of afstoten. Het was duidelijk dat dit iets te maken had met de polen en Perginus kwam op het idee deze polen de namen "Noord" en "Zuid" te geven.
De kruisvaarder ontwierp verder het eerste bruikbare kompas, door een draaibare gemagnetiseerde naald boven een geijkte schaalverdeling te laten draaien. Overigens dacht Perginus dat de vreemdsoortige werking van het kompas iets te maken had met de vaste positie van de sterren aan de hemel.

Wiliam Gilbert

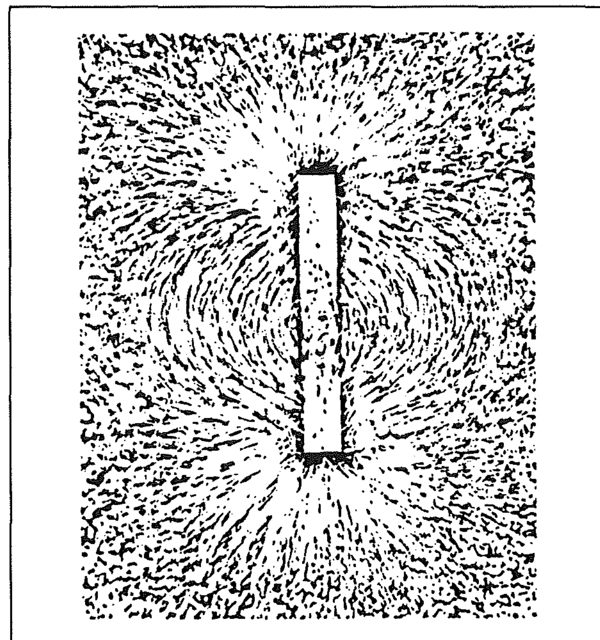
Het duurt tot 1600 alvorens het magnetiet en het electrium-verschijnsel wetenschappelijk worden bestudeerd en beschreven. De Engelse wetenschapper Gilbert (figuur 3/2.3-2) schreef in dat jaar een boek "Over de magneten", waarin hij een duidelijk onderscheid maakte tussen magnetische en elektrische aantrekking.
Hij beschouwde de aarde als een enorme magneet en bewees dat kompasnaalden zich richtten naar deze magneet en dat sterren niets te maken hebben met de werking van het kompas. Verder ontdekte hij, door ijzervijlsel rond een staaf magnetiet te strooien, het magnetisch veld (figuur 3/2.3-3). Hij ontdekte dat de naalden van Perginus zich richtten volgens dat magnetisch veld. Gilbert noemde dit verschijnsel echter "de aura", een diepzinnig Goddelijk verschijnsel dat zich rond de magneet bevond en zich in alle richtingen uitspreidde.

2.3 Een kort historisch overzicht

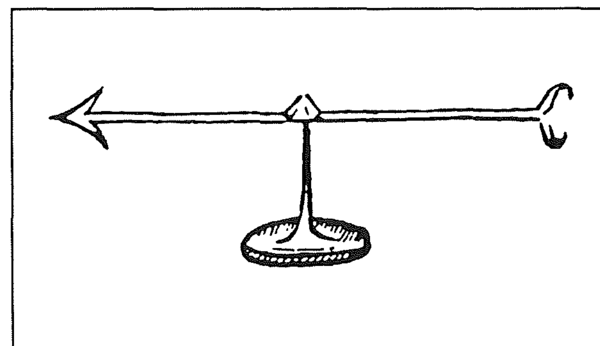


Figuur 3/2.3-2: William Gilbert, die het eerste boek schreef over magnetisme en elektriciteit.

Hij ontdekte dat het electrium-verschijnsel niet alleen met barnsteen kon worden opgewekt, maar ook met een heleboel andere stoffen. Om het verschijnsel te kunnen bestuderen ontwierp Gilbert het allereerste elektrisch meetinstrument, het "versorium". Zoals uit figuur 3/2.3-4 blijkt bestaat dit versorium uit niets anders dan een naald uit een willekeurig metaal, die balanceert op een scherpe punt. Voorwerpen die het electrium-verschijnsel vertonen brengen de naald aan het draaien als men ermee in de buurt van de naald komt. Dank zij het versorium was men in staat de aantrekkingskracht van verschillende gewreven materialen te vergelijken. Gilbert noemde stoffen die de naald aantrokken "elektrisch" en dit is, voor zover bekend, het eerste boek waarin dit woord werd gebruikt.



Figuur 3/2.3-3: De "Goddelijke aura" rond een staaf magnetiet, die door Gilbert werd ontdekt.



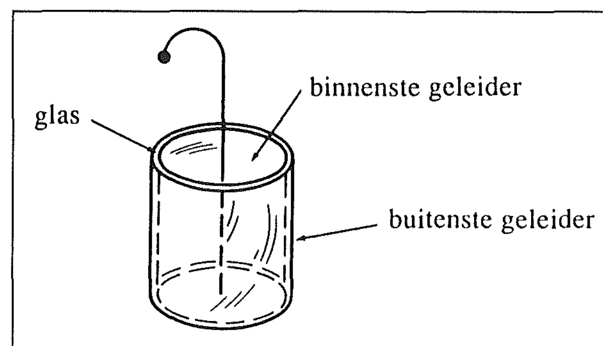
Figuur 3/2.3-4: Het "versorium" van Gilbert.

Charles Dufay

In het jaar 1734 ontdekte de Franse vorser Dufay dat een glazen staaf die met een zijden doek was gewreven een tegengestelde kracht uitoefende op de naald van een versorium dan een harsstaaf die met een dierenvel was gewreven. Bovendien kon hij aantonen dat deze krachten van het ene naar het andere materiaal konden

worden overgebracht door ze te verbinden met een koperen draadje. Dufay verklaarde dit verschijnsel door te veronderstellen dat er een soort onzichtbare "elektrische vloeistof" bestond die op de een of andere manier van het ene naar het andere voorwerp kon stromen. Dit is de oorsprong van het begrip "elektrische stroom"! Volgens Dufay bestonden er twee soorten elektrische vloeistof, namelijk "glasachtige" en "harsachtige". Door voorwerpen te wrijven met doeken of vellen werden deze "volgeladen" met de vloeistof. Dufay ontdekte experimenteel dat twee voorwerpen die met dezelfde elektrische vloeistof waren volgeladen elkaar afstootten en dat voorwerpen die met verschillende elektrische vloeistof waren volgeladen elkaar aantrokken. Dufay vroeg zich af of er verband bestaat tussen elektriciteit en magnetisme. Men had in die tijd immers reeds ontdekt dat er ook twee soorten magnetisme bestaan, die elkaar kunnen aantrekken of afstoten. Hiermee kan Dufay als de grondlegger van de elektromagnetische theorie worden beschouwd, hoewel die eer officieel naar Maxwell gaat.
Bovendien stelde hij vast dat voorwerpen die volgeladen waren met tegengestelde elektrische vloeistoffen en die in elkaars nabijheid werden gebracht vonkjes veroorzaakten.

Pieter van Musschenbroek
De Nederlander van Musschenbroek kan geboekstaafd worden als de uitvinder van de condensator. In die tijd werden allerlei pogingen ondernomen om die vreemde elektrische vloeistoffen ergens in te kunnen opslaan. Om een lang verhaal kort te maken volstaat het te vermelden dat van Musschenbroek, een professor aan de universiteit van Leiden, er in 1745 als eerste in slaagde om die vreemde vloeistoffen op te bergen in een fles. Die fles is sindsdien bekend onder de naam "Leidse fles". Een Leidse fles bestaat, zie figuur 3/2.3-5, uit een glazen vat, dat aan weerszijden voorzien is van een geleidende laag. Men gebruikte in die jaren dunne folies van metalen, die op de glazen wanden van het vat werden gekleefd. Het glazen vat werd gevuld met metaalsnippers en voorzien van een centrale geleider, voorzien van een bolletje.



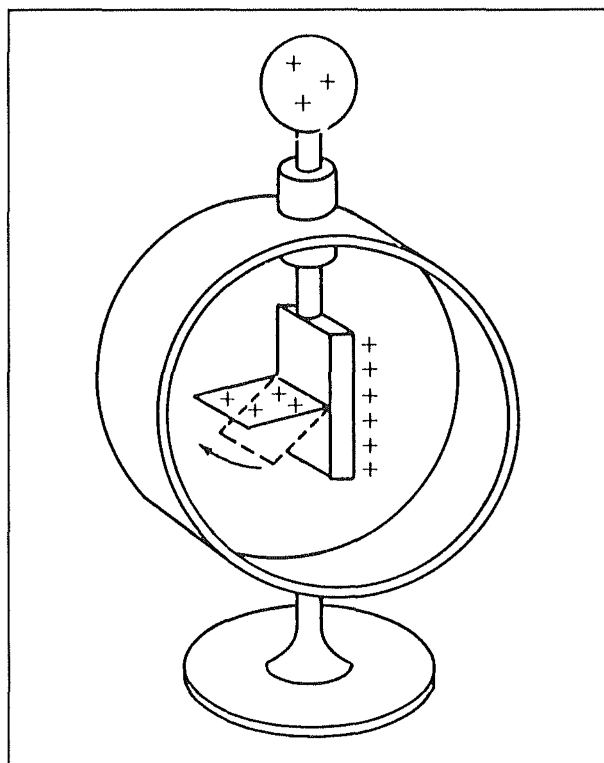
Figuur 3/2.3-5: De Leidse fles van Musschenbroek.

Als men de buitenste folie verbond met de aarde en het bolletje van de centrale geleider in aanraking bracht met een volgeladen voorwerp, dan bleek dat de elektrische vloeistof van het voorwerp afvloeide naar de glazen pot en zich daar verzamelde. Bracht men enige keren de elektrische vloeistof van een volgeladen voorwerp over naar de Leidse fles en raakte men nadien het bolletje van de centrale geleider aan, dan kreeg men een flinke schok! In feite was de Leidse fles niets anders dan de eerste condensator die werd gemaakt. De twee metalen folies zou men nu de "elektroden" van de condensator noemen, de glazen wand van het vat het "diëlektricum".

2.3 Een kort historisch overzicht

Men kwam er achter dat de capaciteit van een Leidse fles kon worden verhoogd door verschillende flessen in serie te schakelen. Dit experiment was dus de voorloper van de hedendaagse batterij, waarin verschillende cellen in serie worden geschakeld om de spanning te verhogen.

De elektroscoop
Het tweede elektrisch meetinstrument dat werd uitgevonden was de "elektroscoop". Er is niet meer te achterhalen aan wie de eer van deze uitvinding kan worden toegeschreven, want elektroscopen duiken overal in het midden van de achttiende eeuw in de literatuur op. Ook nu zijn elektroscopen vaak toegepaste meetinstrumenten in de statische elektriciteitsleer.



Figuur 3/2.3-6: Een elektroscoop, waarmee men de hoeveelheid elektrische vloeistof op een primitieve manier kon meten.

Een elektroscoop bestaat, zie figuur 3/2.3-6, uit een smalle metalen cilinder voorzien van een glazen voor- en achterkant. De cilinder is via een isolator bevestigd op een voet. In de cilinder wordt een geïsoleerde metalen staaf aangebracht die aan een kant voorzien is van een metalen bol en aan de andere kant van een metalen plaatje. Op het metalen plaatje is een zeer dunne gouden folie bevestigd en wel zo dat de folie vrij kan bewegen ten opzichte van het plaatje.
Bracht men nu een voorwerp dat is volgeladen met glasachtige of harsachtige elektrische vloeistof in de buurt van de metalen bol, dan stelde men vast dat de folie ging uitwijken van het metalen plaatje. De mate van uitwijking werd een maat voor de hoeveelheid elektrische vloeistof waarmee het voorwerp was volgeladen. Bovendien stelde men vast dat men de uitwijking van de folie weer kon opheffen door nadien een voorwerp dat was volgeladen met tegengestelde elektrische vloeistof in de buurt van de bol te houden.

Benjamin Franklin
De Amerikaan Benjamin Franklin heeft het wetenschappelijk onderzoek naar elektrische verschijnselen in een stroomversnelling gebracht. Zijn proef met een vlieger in een onweersbui in 1752 is wereldberoemd geworden. Hiermee bewees hij dat bliksem niets anders is dan de tot zeer grote schaal vergrote vonkjes die Dufay zag tussen zijn volgeladen voorwerpen. Franklin is ook de man die definitief afrekende met de elektrische vloeistoffen van Dufay. Hij voerde in het jaar 1747 de begrippen "positieve en negatieve elektrische lading" in en meende dat die lading alleen in één richting kon vloeien, namelijk van een voorwerp met positieve lading naar een voorwerp met negatieve lading.

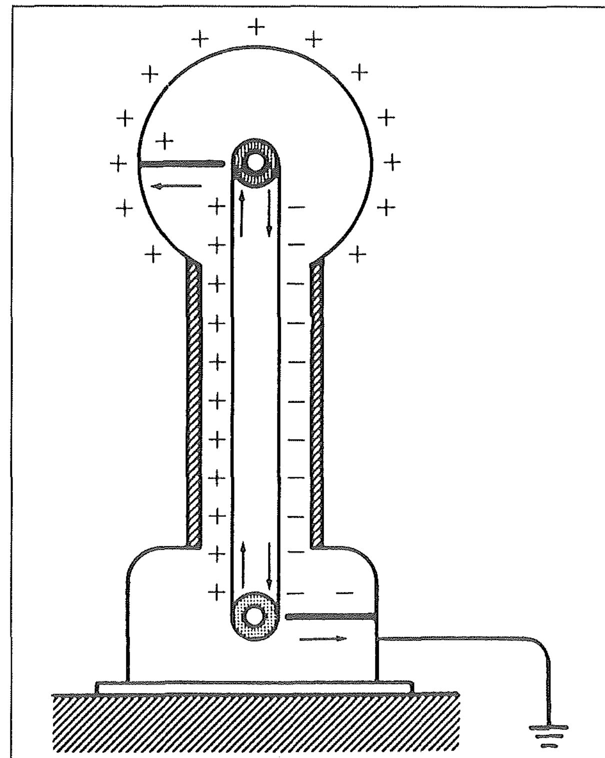
Het vloeien van deze lading werd een "elektrische stroom" genoemd. Vanuit die tijd stamt de gewoonte om ook nu nog steeds de elektrische stroom te beschouwen als een verschijnsel dat van de plus naar de min vloeit, hoewel dat in feite natuurlijk niet het geval is. Een elektrische stroom bestaat in het echt immers uit elektronen en deze vloeien van de min naar de plus.
Door de begrippen elektrische lading en elektrische stroom in te voeren konden de verschijnselen in een elektroscoop beter verklaard worden.

John Canton

De theorie van Franklin krijgt in 1754 flinke ondersteuning als Canton ontdekt dat een glazen staaf zowel positief als negatief opgeladen kan worden. Het hangt er maar van af met welke stof de glazen staaf opgeladen wordt. Hierdoor kreeg de theorie van Dufay van glasachtige en harsachtige vloeistoffen de definitieve doodsteek.

De "elektriseermachines"

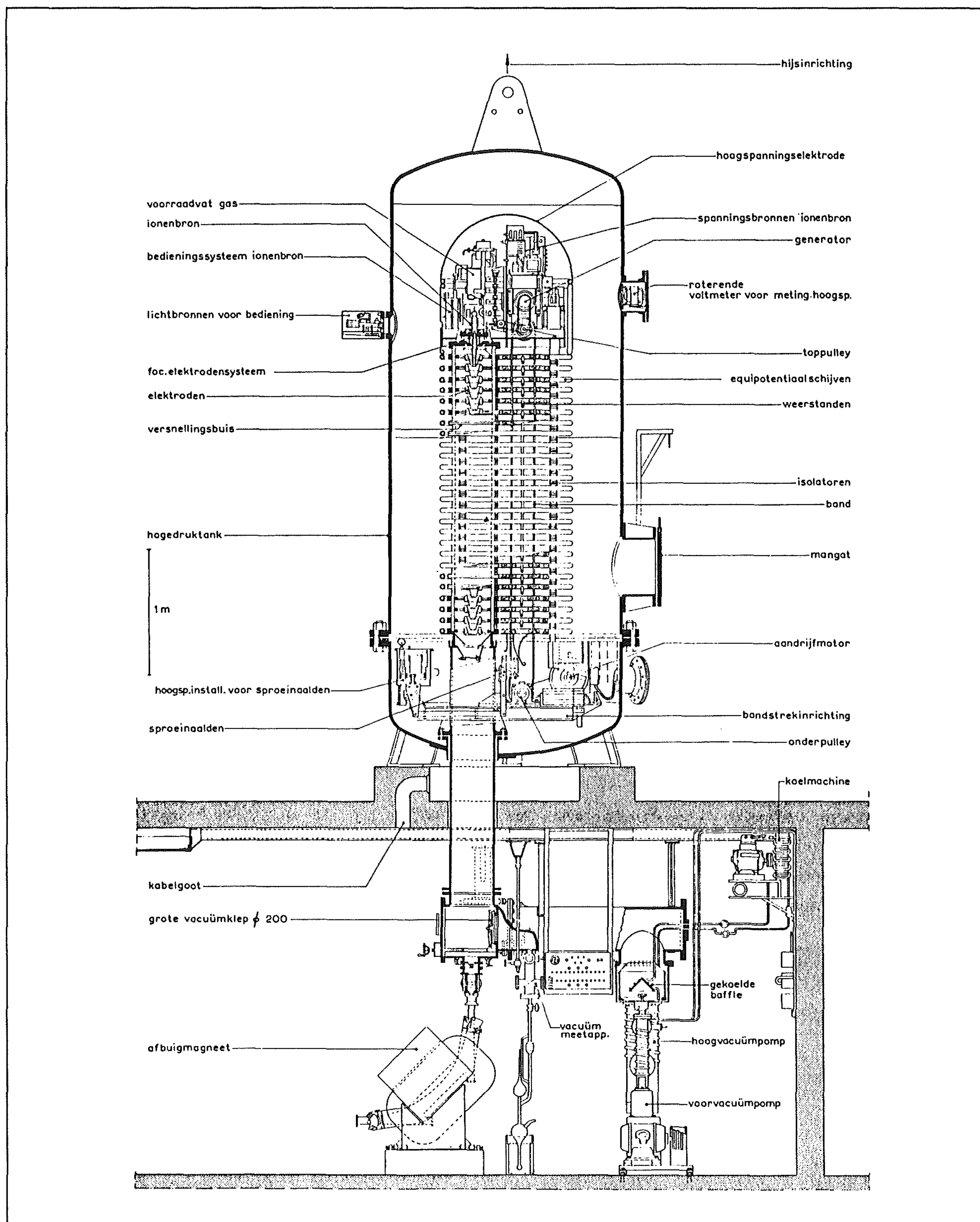
De mensheid is lui en het voortdurend wrijven met huidenvellen over barnsteen is uitermate vermoeiend. Dus ging de mensheid op zoek naar apparaten, waarmee dit proces geautomatiseerd kon worden. De allereerste "elektriseermachine" werd rond 1660 ontworpen door de Duitse wetenschapper Otto van Guericke. Dit apparaat bestond uit een rond te draaien cilinder van gesmolten zwavel, waarop een metalen kam was aangebracht die zorgde voor de noodzakelijke wrijving. De in die tijd nog elektrische vloeistoffen genoemde ladingen werden verzameld in een metalen bol aan de bovenzijde van de kam. Deze eerste elektrische generator maakte het onderzoek naar elektrische verschijnselen uiteraard veel gemakkelijker. Wie nu denkt dat dergelijke apparatuur alleen in een oudheidkundig museum te bewonderen valt heeft het mis!
Een van de bekendste elektriseerapparaten is de "Van de Graaf generator", waarvan in figuur 3/2.3-7 een doorsnede is getekend. Van de Graaff was geen Nederlander, zoals vaak wordt gedacht, maar een Amerikaan. In het jaar 1929 bouwde deze fysicus zijn Van de Graaff generator, die in principe op precies dezelfde manier werkt als de allereerste elektriseermachines, maar waarmee spanningen tot meer dan een miljoen volt konden worden opgewekt.



Figuur 3/2.3-7: Principe van de "Van de Graaf generator".

Het apparaat bestaat uit een eindeloze band uit katoen, die aan de boven- en onderzijde wordt afgeschraapt met metalen kammen.

2.3 Een kort historisch overzicht



Figuur 3/2.3-8: Een moderne Van de Graaff generator.

De wrijving tussen de band en de metalen kammen zorgt voor een oplading van de band. De negatieve lading wordt afgevoerd naar de aarde via de onderste metalen kam. De positieve lading wordt overgebracht naar een grote metalen bol aan de bovenzijde van de generator. De bol aan de bovenzijde kan opgevat worden als een hele grote Leidse fles, waarin heel wat lading verzameld kan worden. Met de allereerste Van de Graaf generatoren was men in staat miniatuur bliksems te maken.

Van de Graaff generatoren worden in het moderne wetenschappelijke onderzoek nog steeds gebruikt. Men is nu in staat spanningen van tientallen miljoenen volt op te wekken, spanningen die gebruikt worden om ionenstromen uit atomen te genereren en deze (zware) ionen te laten botsen met atomen. In figuur 3/2.3-8 is als voorbeeld de doorsnede getekend van een moderne van der Graaff generator, die opgesteld is in de Technische Hogeschool van Delft. Ondanks alle moderne snufjes wekt het apparaat nog steeds dank zij een eindeloze band, die door een elektromotor wordt rondgedraaid, een spanning van 5 MV op.

John Michell

Terug nu in de geschiedenis! In het jaar 1750 probeerde de Engelse theologiestudent Michell de aantrekkingskracht tussen twee magneten wiskundig te formuleren.

Daarvoor ontwierp hij een heel gevoelige balans en kwam er achter dat de aantrekkingskracht omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de afstand tussen beide magneten en recht evenredig met de sterkte van de magneten.

In formulevorm:

$$F=K_m.[(p_1.p_2)/s^2]$$

De term K_m werd de "magnetische constante" genoemd.

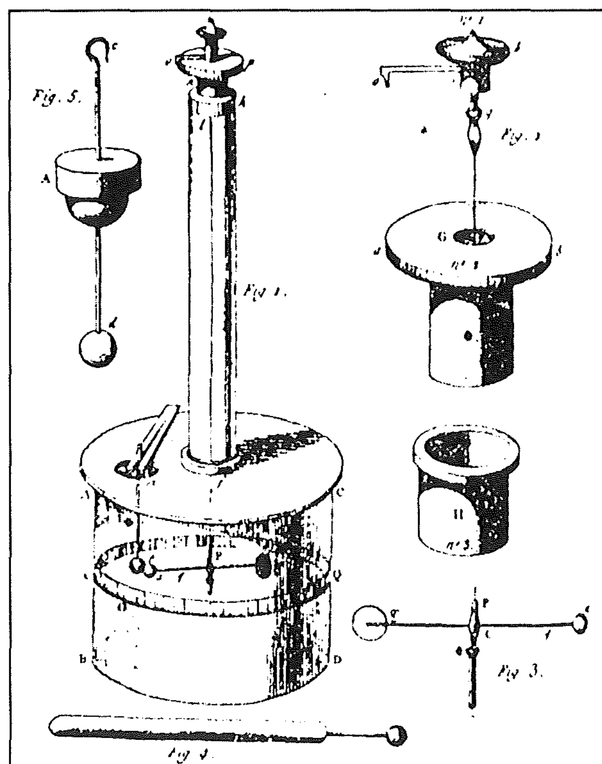
Henry Cavendish

Door de gedachten van Franklin waren onzinnige ideeën over elektrische vloeistoffen vervangen door zinnige ideeën over ladingen. Ladingen die elkaar aantrokken, bovendien. Dat voorwerpen op afstand elkaar konden beïnvloeden door aantrekking was niet nieuw. Newton had immers in het jaar 1687 zijn wereldberoemd boek "Principia" geschreven, waarin een wiskundige beschrijving werd gegeven van de zwaartekracht (de gravitationele kracht) tussen voorwerpen in de ruimte. Newton bewees dat de gravitatiekracht tussen twee voorwerpen recht evenredig is met hun massa's en omgekeerd evenredig is met het kwadraat van hun onderlinge afstand. Met deze eenvoudige wiskundige wet bleek het mogelijk de bewegingen van alle planeten van ons zonnestelsel zeer nauwkeurig te beschrijven. De grootste revolutie die de menselijke wetenschap tot nu toe heeft meegemaakt! Bovendien had Michell in 1750 een identieke wet opgesteld voor de kracht die twee magneten op elkaar uitoefenden.

Het lag dus voor de hand dat men op zoek ging naar een soortgelijke wiskundige beschrijving van de elektrische aantrekkingskracht tussen positief en negatief geladen voorwerpen. Dank zij de elektroscoop kon men de grootte van elektrische ladingen meten. In het jaar 1772 deed de Engelsman Cavendish een aantal proeven waaruit bleek dat de aantrekkende kracht tussen een positieve en een negatieve geladen voorwerp recht evenredig is met de grootte van hun ladingen en omgekeerd evenredig is met het kwadraat van de af-

2.3 Een kort historisch overzicht

stand tussen de geladen voorwerpen. Een meer dan toevallige overeenkomst met de formule die Newton vond voor de gravitationele aantrekking tussen voorwerpen en met de wet van Michell! Helaas verzuimde Cavendish de resultaten van zijn experimenten in een of ander beroemd wetenschappelijk tijdschrift te publiceren. Zijn geschriften werden pas later teruggevonden, lang nadat een andere wetenschapper dezelfde formule experimenteel had aangetoond.



Figuur 3/2.3-9: De originele tekeningen van de torsie-balans van Coulomb.

Charles Coulomb

Het is volgens de officiële geschiedschrijving Coulomb die in het jaar 1788 met zijn beroemde "wet van Coulomb" de eer kon opeisen om de elektrische aantrekking tussen geladen voorwerpen volledig wiskundig beschreven te hebben. Coulomb gebruikte voor zijn experimenten een heel ingenieus apparaat, getekend in figuur 3/2.3-9.

Met deze torsie-balans kon de kracht worden bepaald die twee even grote elektrisch opgeladen bollen op elkaar uitoefenden. Het volstond de hoek te meten waarover de balans draaide om voor iedere afstand tussen de bollen een maat voor de kracht te berekenen.
Met dit apparaat ontdekte Coulomb hetzelfde als Cavendish acht jaar eerder had uitgevonden. De wiskundige wet die de aantrekkingskracht tussen twee elektrisch geladen voorwerpen definieert en bekend staat als de eerste wet van Coulomb luidt:

$$F=K_e.[(q_1.q_2)/s^2]$$

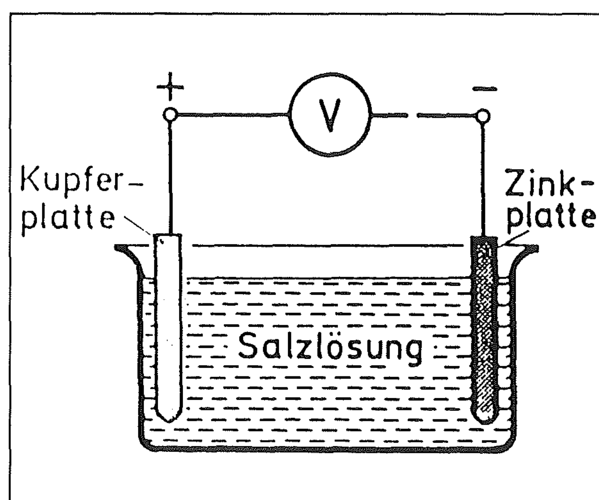
In normale taal: de kracht F die twee elektrisch geladen voorwerpen op elkaar uitoefenen is gelijk aan het product van hun ladingen q_1 en q_2, gedeeld door het kwadraat van hun onderlinge afstand s en vermenigvuldigd met een bepaalde constante factor K_e. Die constante werd de "elektrische constante" genoemd en nu is bekend dat deze constante, net als K_m, een van de zogenoemde "natuurconstanten" is. Dertien getallen voor constante factoren die in natuurkundige formules voorkomen en die in wezen er voor zorgen dat het heelal is zoals het is.
In tegenstelling tot de zwaartekracht kon deze elektrische kracht echter zowel aantrekkend als afstotend werken. Maar voor de rest waren de formules van Newton, Michell en Coulomb exact aan elkaar gelijk! De eerste grote unificatie, theorieën die proberen verschijnselen op verschillende gebieden van de natuur te herleiden tot één wiskundige formulering, was een feit!

2.3 Een kort historisch overzicht

Als eerbewijs voor deze ontdekking wordt later de eenheid van elektrische lading naar deze geleerde genoemd.

Luigi Galvani
De Italiaan Galvani voerde rond 1790 experimenten uit op dode kikkers en ontdekte dat elektrische vonkjes die in de buurt van een dode kikker ontstaan de spieren doen samentrekken. Bovendien bleek dat als men twee verschillende metalen draadjes in contact bracht met een vochtige kikkerspier deze ook een lichte vorm van samentrekking vertoonde. Galvani dacht dat dit verschijnsel te vergelijken was met de eerder ontdekte Leidse fles en schreef dit verschijnsel toe aan een nieuw soort elektriciteit in het lichaam van de kikker, die hij "dierlijke elektriciteit" noemde.

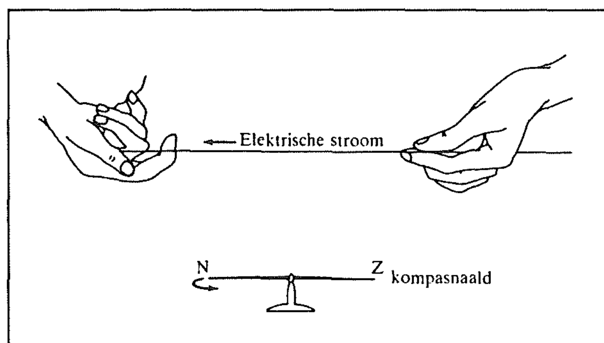
Alessandro Volta
Landgenoot Volta werd geïntrigeerd door de experimenten van Galvani, maar concludeerde dat er geen sprake is van een andere soort elektriciteit. Hij dacht dat de samentrekkingen van de spieren iets te maken had met het feit dat elektriciteit kon opgewekt worden als men geleiders van verschillende samenstelling in een vochtige omgeving aanbracht. Deze (juiste) conclusie voerde hem tot de uitvinding van het allereerste elektrische element, die ter ere van zijn landgenoot "Galvanisch element" werd genoemd.
Dit bestond uit een koperen en een zinken plaat, in contact met een in verdund zwavelzuur gedompelde doek (figuur 3/2.3-10). Met dit element kon men gedurende een kleine tijd een elektrische lading laten vloeien van de ene naar de andere plaat. Dit was dus in feite de eerste batterij! Volta ontdekte bovendien dat men een aantal galvanische elementen in serie kon schakelen om meer elektriciteit op te wekken. Een dergelijke serieschakeling staat bekend als een "zuil van Volta". Volta is ook de eerste wetenschapper die het vloeien van elektriciteit door een elektrische geleider consequent aanduidde met het begrip "elektrische stroom". Het verschil in lading tussen twee punten werd door hem "het potentiaal" genoemd en dit was een maat voor de "grootte van de elektriciteit". Als eerbewijs voor deze definitie van de grootte van elektrische spanning werd haar eenheid later de Volt genoemd.



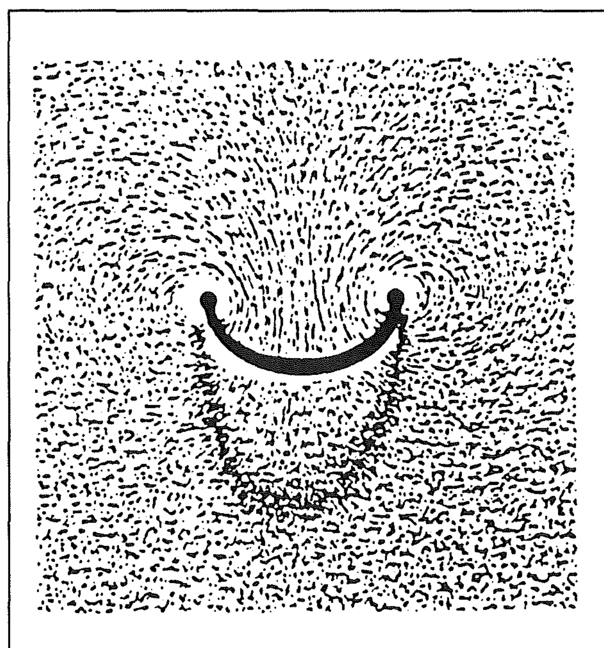
Figuur 3/2.3-10: De samenstelling van een galvanisch element.

Hans Christian Œrsted
De Deen Œrsted ontdekte in 1820 dat een magneetnaald afweek van de rustpositie als er in de buurt van de naald een stroomvoerende geleider werd aangebracht (figuur 3/2.3-11).
Blijkbaar moest er dus rond een stroomvoerende geleider een magnetisch veld ontstaan! Œrsted kon dit experimenteel bevestigen door een stroomvoerende geleider lusvormig in een stuk karton aan te brengen en fijn ijzervijlsel op het karton te strooien.

2.3 Een kort historisch overzicht



Figuur 3/2.3-11: De proef van Œrsted die het verband tussen magnetisme en elektriciteit definitief aantoonde.



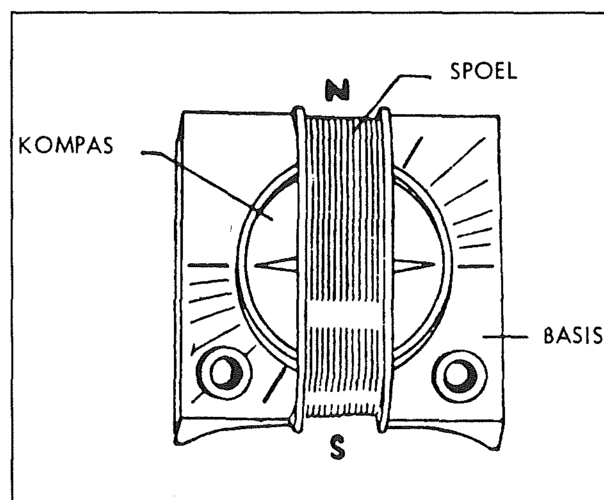
Figuur 3/2.3-12: De proef van Œrsted, waaruit blijkt dat er rond een stroomvoerende geleider een magnetisch veld ontstaat.

Het ijzervijlsel richtte zich volgens de uit het magnetisme bekende magnetische veldlijnen (figuur 3/2.3-12).

De naam Œrsted leeft voort als eenheid van de magnetische veldsterkte.



Figuur 3/2.3-13: André-Marie Ampère.



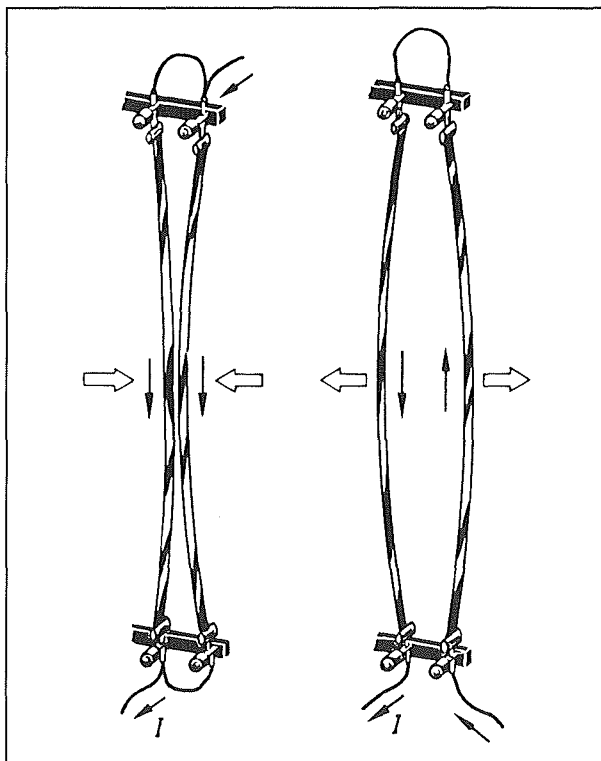
Figuur 3/2.3-14: De door Ampère uitgevonden "galvanometer", waarmee men voor het eerst heel kleine stromen kon meten.

André-Marie Ampère

De Franse wis- en natuurkundige Ampère (figuur 3/2.3-13), die leefde van 1775 tot

1836, heeft erg veel bijgedragen aan de ontwikkeling van de theorieën over magnetisme en elektriciteit. Hij was niet alleen een geniaal wiskundige, maar ook een handige experimentator die heel wat fundamentele experimenten uitvoerde die inzicht gaven in elektrische en magnetische verschijnselen.

Zo was hij de eerste wetenschapper die een duidelijke scheiding maakte tussen de begrippen stroom en potentiaal.
Hij zette de experimenten van Œrsted verder en ontwierp de "galvanometer" van figuur 3/2.3-14.



Figuur 3/2.3-15: De proefneming van Ampère die later de basis zou worden voor het exact definiëren van de waarde van een stroom van 1 A.

Een galvanometer bestaat uit een basisplaat, waarop een kompasnaald wordt bevestigd. Rond het kompas is een grote cilinder aangebracht, waarop vele windingen koperdraad worden gewikkeld. In rust richt de kompasnaald zich naar het magnetisch veld van de aarde. Voert men echter een stroom door de spoel, dan zal het aardveld plaatselijk verstoord worden door het magnetisch veld dat rond de stroomvoerende geleiders ontstaat. De kompasnaald gaat naar een andere stand verdraaien en de draaihoek is een maat voor de grootte van de stroom. Met deze galvanometer kon Ampère zeer zwakke stromen detecteren en hun waarde vergelijken.

Hij onderzocht de verschijnselen die ontstaan als men stromen laat vloeien door twee evenwijdig opgestelde draden (figuur 3/2.3-15). Als de twee draden doorlopen worden door stromen die in dezelfde richting vloeien, trekken de draden elkaar aan. Draait men in één draad de stroomrichting om, dat stoten de draden elkaar af. Ampère was in staat de krachten vrij nauwkeurig te meten en enige wetmatigheden rond dit verschijnsel wiskundig te definiëren.
Hij beschreef zijn theorieën in 1826 in een boek, "Theorie van de elektrodynamische verschijnselen" genoemd, waarin werd geponeerd dat magnetisme een kracht is die ontstaat tussen elektrische stromen. Hiermee werd voor het eerst een ondubbelzinnige koppeling gelegd tussen de natuurverschijnselen elektriciteit en magnetisme. Een koppeling die uiteindelijk zou voeren tot het opstellen van de elektromagnetische veldtheorie door Maxwell in 1873.

George Simon Ohm
In 1826 ontdekte de Duitse hoogleraar Ohm de samenhang tussen stroom, spanning en weerstand en stelde zijn beroem-

2.3 Een kort historisch overzicht

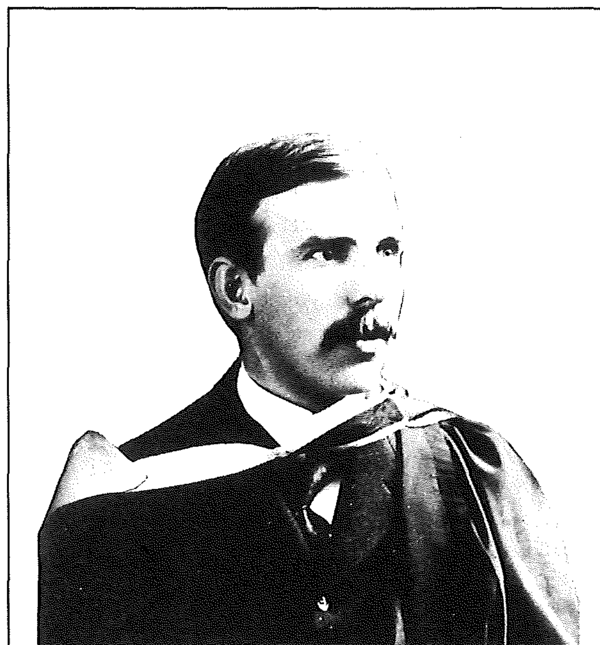
de "wet van Ohm" op, die in praktische vorm bekend staat als:

U=I.R

Ofwel: de spanning over een weerstand is recht evenredig met de waarde van de weerstand en met de grootte van de stroom die door de weerstand vloeit.

Michael Faraday
De Engelse zelfdidact Faraday ging verder op de weg die door Œrsted en Ampère werd bewandeld en ontdekte in 1831 het principe van de inductie. Als men twee draden parallel opstelt en door één draad een ***variërende*** stroom stuurt, dan zal in de tweede draad een stroom ontstaan die evenredig is met de snelheid en de grootte van de stroomvariatie in de eerste draad. Bovendien ontdekte Faraday dat er ook een stroom in een draad ontstaat als men een magneet in de buurt van de draad beweegt. Hij stelde een wet op die "de inductiewet van Faraday" werd genoemd en waarin de experimenteel onderzochte verschijnselen wiskundig werden beschreven. Deze inductiewet vormt de basis van een heel groot gebied van de moderne elektrotechniek en elektronica, immers de werking van dynamo's, elektromotoren, generatoren en transformatoren berust op deze wet. Als eerbewijs voor zijn werk werd later de eenheid van capaciteit, de Farad, naar hem vernoemd.

Parijs, 1881
Het jaar 1881 is een zeer belangrijk jaar voor de elektrotechniek. In dat jaar werd in Parijs een wetenschappelijk congres gehouden, waarin voor het eerst de eenheden Ampère, Coulomb, Farad, Ohm en Volt ondubbelzinnig werden gedefinieerd. Dank zij deze definities kon men experimentele resultaten en wiskundige formules op elkaar afstemmen en in de literatuur beschreven experimenten tot in alle details herhalen.



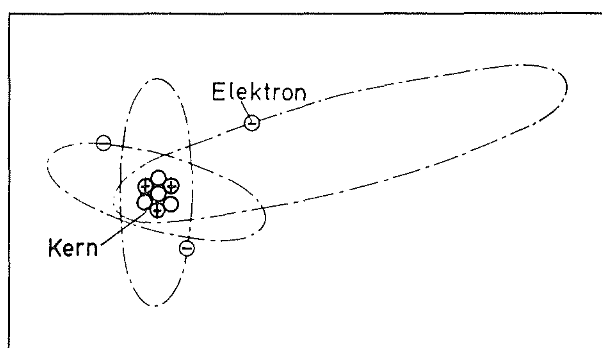
Figuur 3/2.3-16: De ontdekker van het elektron, de Engelsman Rutherford.

Ernest Rutherford
Hoewel de begrippen lading, spanning, capaciteit, weerstand en stroom aan het einde van de negentiende eeuw dus goed bekend waren en men reeds wiskundige formules voor hun onderlinge relatie had opgesteld, was het wezen van de elektriciteit nog steeds niet duidelijk. Wat was nu eigenlijk elektrische stroom? Hoe kwam het dat voorwerpen elektrisch geladen konden worden? Op dergelijke vragen waren nog geen antwoorden. Dat kwam doordat de natuurkundigen nog niet erg veel vorderingen hadden gemaakt met het ontdekken van de samenstelling van de stof. Wel had Dalton reeds in 1810 een atoommodel beschreven, waarmee chemische reacties tussen stoffen verklaard konden worden, maar dat er zoiets als

2.3 Een kort historisch overzicht

elektronen bestonden was nog volstrekt onbekend.

De eer van de ontdekking van het elektron komt toe aan de Engelsman Rutherford (figuur 3/2.3-16). Aan de hand van vrij ingewikkelde experimenten concludeerde deze professor aan de universiteit van Manchester in 1914 dat het atoom van Dalton moest bestaan uit een kleine positief geladen "pit" waar, als een soort planeten, zeer kleine negatief geladen deeltjes omheen moesten vliegen (figuur 3/2.3-17). De pit werd de kern genoemd, de negatief geladen deeltjes de "elektronen". Het aantal elektronen bepaalde de eigenschappen van het atoom. De lading van een elektron werd "de elementaire lading e" genoemd. Ook dat zou later blijken een van de natuurconstanten te zijn. De kern had een positieve lading die gelijk was aan de totale negatieve lading van alle elektronen. De elektronen bleven in hun baan rond de kern vliegen vanwege de aantrekkingskracht tussen de tegengestelde ladingen van kern en elektronen. Toch was het, onder bepaalde omstandigheden, mogelijk elektronen van de kern te scheiden. Die elektronen werden "vrije elektronen" genoemd, het achterblijvende atoom een "ion". Uiteraard was dit laatste positief geladen.



Figuur 3/2.3-17: Het planetaire atoommodel van Rutherford.

Dit was een heel mooi atoommodel, omdat het nogal wat overeenkomsten vertoonde met de samenstelling van het zonnestelsel. Vandaar dat het atoommodel van Rutherford "planetair" werd genoemd en onmiddellijk door alle geleerden werd overgenomen.
Met dit atoommodel kon men eindelijk het wezen van de elektriciteit verklaren. Het vloeien van elektrische stroom door een geleider was niets anders dan een verplaatsing van een heleboel vrije elektronen van atoom tot atoom door de geleider. Ook het opladen van voorwerpen door wrijving kon nu verklaard worden. Door de wrijving werden elektronen uit een atoom bevrijd. Deze vrije elektronen sprongen over van het ene voorwerp naar het andere, al dan niet onder de vorm van vonkjes. Het ene voorwerp had nu een teveel aan elektronen en dus een negatieve lading, het andere voorwerp had een tekort aan elektronen en daardoor een positieve lading.

Niels Bohr en Chadwick
Helaas voor Rutherford bleek zijn atoommodel niet te voldoen aan enkele fundamentele wetten der mechanica. Vandaar dat zijn model vrij snel (in 1917) werd opgevolgd door dat van de Deen Niels Bohr, een model dat overigens niets wijzigde aan de planeetstructuur van het Rutherford-model. Ook het Bohr-model was alles behalve nauwkeurig. Het zou tot 1932 duren alvorens Chadwick ontdekte dat de kern niet de "harde pit" van Rutherford is, maar zélf ook weer bestaat uit andere deeltjes: protonen, waarin de elektrische lading zit en neutronen zonder lading.
Voor het begrijpen van het wezen van de elektriciteit en de elektronica heeft dit alles echter geen belang: men kan daar-

voor ook nu nog steeds terecht bij het aloude Rutherford-model!

Besluit
Van de elektrische vloeistof van Dufay uit 1734 tot het elektron van Rutherford uit 1914 is een lange weg afgelegd.

In die 180 jaar werd echter de theoretische basis gelegd voor alle moderne ontwikkelingen op het gebied van elektriciteit en elektronica. In de volgende hoofdstukken zullen deze fundamentele vondsten en wetten uitgebreid worden behandeld in een meer wetenschappelijk kader.

2.3 Een kort historisch overzicht

3/2.4

Het elektron, de basis van de elektronica

Inleiding

De absolute basis
Elektronen, die volgens de klassieke fysica zeer kleine keiharde bolletjes die in cirkel- en ellipsvormige banen als planeten rond de kern van een atoom draaien, zijn zonder enige twijfel de absolute basis van de elektriciteit en de elektronica. Elektrische stroom is immers niets anders dan een zeer grote hoeveelheid van deze elektronen die zich in één richting door een geleider beweegt. Wie dus de "natuurkundige basis van de elektronica" wil bestuderen moet beginnen bij de absolute basis: het elektron.

De bouw der materie
Het elektron kan echter niet bestudeerd worden zonder dat enige kennis over de bouw der materie aanwezig is. Vandaar dat in dit hoofdstuk wordt begonnen met een kort overzicht van de theorieën die men in de loop der geschiedenis over dit onderwerp heeft verzonnen.

Stralende elektronen
Nadien wordt een vreemde eigenschap van elektronen besproken. Een eigenschap die echter zeer belangrijk is in de elektronica, want zonder deze eigenschap zouden er bijvoorbeeld geen LED's bestaan. Het blijkt dat elektronen onder bepaalde omstandigheden licht kunnen uitstralen. Hoe dit verschijnsel volgens de klassieke fysica verklaard wordt komt aan de orde in het tweede deel van dit hoofdstuk.

Vrije elektronen
Tot slot zullen de elektronen losgekoppeld worden van hun atomen, want dat is absolute noodzaak voor het vloeien van elektrische stroom. Dergelijke elektronen noemt men vrije elektronen en hoe de fysische processen werken die elektronen kunnen bevrijden uit hun atoom vormt het laatste onderwerp van dit hoofdstuk.

De bouw der materie

De oudheid
Reeds de prehistorische mens zag een groot rotsblok van een berg vallen en daardoor versplinteren in duizenden kleine brokstukken. Het ligt voor de hand dat deze prehistorische mens zich de vraag stelde of die kleine brokstukken op hun beurt weer te versplinteren waren en of het minuscuul kleine zandkorreltje van het strand ooit deel had uitgemaakt van zo'n groot indrukwekkend rotsblok. Of die prehistorische mens nog verder doordacht en zich de vraag stelde of dat zandkorreltje ook weer te versplinteren was in

2.4 Het elektron, de basis van de elektronica

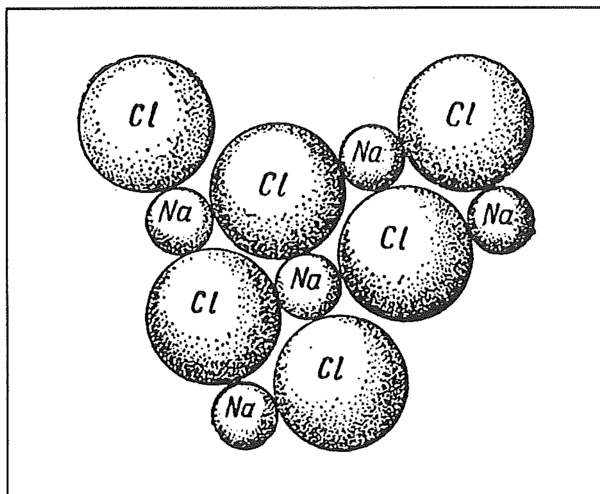
duizenden onzichtbare brokstukjes is uiteraard niet bekend. Die vraag werd echter wél reeds gesteld door Indiase filosofen die zo'n 1.200 jaar voor onze jaartelling leefden en door Griekse filosofen als Democritus in de vijfde eeuw voor Christus.
Deze denkers vonden het idee dat materie tot in het oneindige deelbaar was niet aantrekkelijk. Dat is ook logisch, want als men over dit probleem doordenkt is de logische consequentie van oneindig deelbare materie dat er in feite helemaal geen materie kan bestaan! De basis van alles zou dan immers een oneindig klein iets zijn en het is moeilijk in te zien hoe uit het oneindig kleine iets kan ontstaan dat niet oneinig klein is!
Ergens moet dus een allerkleinste brokje materie zijn, dat door de Grieken "atomos" werd genoemd, letterlijk vertaald "het ondeelbare". Democritus veronderstelde dat deze atomen eeuwig bestonden, ondoordringbaar en hard waren en in de lege ruimte bewogen. De aard van deze beweging bepaalde de eigenschappen van de materie. Op deze manier werd verklaard hoe uit een beperk aantal verschillende atomen (water, aarde lucht en vuur) alle stoffen konden ontstaan die in de natuur aanwezig waren. Ook de bekende Griekse filosoof Aristoteles nam de theorie van het atomos over, zij het dat hij deze kleinste ondeelbare materie "minima naturalis" oftewel het natuurlijke minimum noemde.

De atoomtheorie van Dalton

Het duurde tot het begin van de negentiende eeuw alvorens de wazige filosofische begrippen van de oude Grieken in een min of meer wetenschappelijke vorm werden geformuleerd. Die eer komt toe aan de Engelse chemicus John Dalton, die tussen 1803 en 1810 het boek "A new system of chemical philosophy" schreef.
In dit boek beschreef Dalton een beeld van de materie dat was gebaseerd op eenvoudige chemische proeven die veel eerder waren uitgevoerd door bijvoorbeeld de Fransman Lavoisier. Lavoisier ontdekte dat bij chemische reacties tussen stoffen er steeds sprake is van gewichtsverhoudingen die met elkaar reageren.
Zo reageert bijvoorbeeld 16 gram zuurstof met 14 gram stikstof en het resultaat is 30 gram stikstofmonoxyde (NO). Is er teveel zuurstof of stikstof aanwezig, dan zal dat na de reactie onaangetast worden terug gevonden.
Dalton formuleerde uit dergelijke experimenten de volgende veronderstellingen:
- alle stoffen bestaan uit atomen;
- er bestaat een beperkt aantal onderling verschillende atomen;
- deze atomen zijn de kleinste materiedeeltjes;
- deze atomen zijn ondeelbaar;
- de atomen hebben onderling bepaalde gewichtsverhoudingen;
- de eigenschappen van de stoffen worden bepaald door het soort atomen waaruit zij bestaan;
- er bestaan bepaalde stoffen die uit slechts één soort atomen bestaan, deze stoffen werden "elementen" genoemd;
- chemische reacties ontstaan doordat de atomen van stoffen op de een of andere manier een verbinding met elkaar aangaan waardoor een nieuwe stof ontstaat met eigenschappen die niet te vergelijken zijn met de eigenschappen van de reagerende stoffen.

Als voorbeeld van deze laatste stelling is in figuur 3/2.4-1 getekend hoe Dalton zich voorstelde dat atomen natrium (Na) zich verbinden met atomen chloor (Cl), waardoor NaCl (keukenzout) ontstaat.

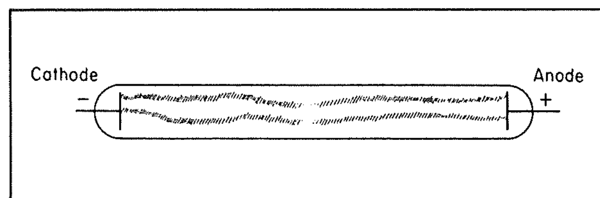
2.4 Het elektron, de basis van de elektronica



Figuur 3/2.4-1: De verbinding van atomen chloor en natrium tot keukenzout volgens de theorie van Dalton.

Aan de hand van deze stellingen was Dalton in staat het begrip "atoomgewicht" in te voeren. Het gewicht van atomen werd uitgedrukt door het te vergelijken met het gewicht van een standaard atoom. Als standaard gebruikte Dalton het gewicht van het waterstof atoom. Op deze manier kon men een schaal met relatieve atoomgewichten opstellen en kreeg bijvoorbeeld het zuurstofatoom het atoomgewicht 16. Hoe nu een atoom er uitzag, daarover had Dalton geen enkel idee. In die tijd was dat ook niet noodzakelijk, want de eenvoudige theorie van Dalton met zijn atoomgewichten voldeed uitstekend voor het verklaren van chemische reacties.

De geheimzinnige kathodestralen
Dat er met de atomen van Dalton meer aan de hand was bleek toen de eerste experimenten met elektrische geleiding van gassen werden uitgevoerd. Zo bleek bijvoorbeeld dat een gas, in het algemeen een zeer slechte geleider van de elektrische stroom, onder bepaalde omstandigheden toch geleidend kan worden. Hoewel een groot aantal experimentatoren hebben bijgedragen aan het onderzoek van dit verschijnsel, wordt de eer van het ontdekken van de gasontlading toegekend aan Faraday. In de opstelling van Faraday worden twee elektroden ingesmolten in een glazen buisje. Tussen de elektroden wordt een grote gelijkspanning gezet. Als men nu de lucht uit de buis begint te pompen zal men op een bepaald moment vaststellen dat er in de buis een vreemd violet gekleurd licht ontstaat en dat er een elektrische stroom door de buis vloeit. Dit experiment is voorgesteld in figuur 3/2.4-2.

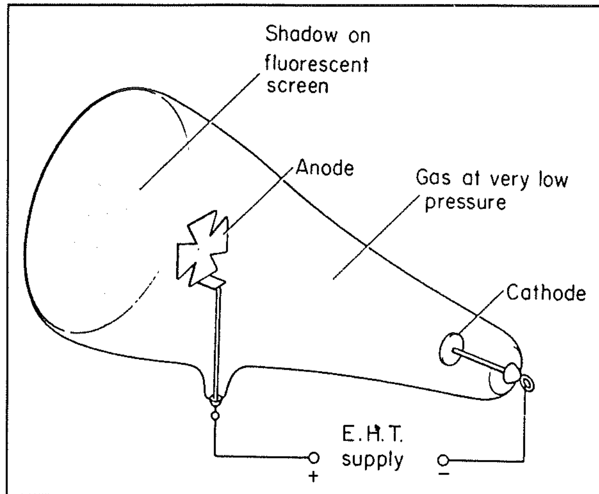


Figuur 3/2.4-2: De proef van Faraday waarmee werd vastgesteld dat gassen onder bepaalde omstandigheden elektrische stroom geleiden.

Het lichteffect werd toegeschreven aan straling die afkomstig was uit de kathode en zich door het gas voort plantte. Deze straling werd vandaar "kathodestraling" genoemd. In een ander experiment, geschetst in figuur 3/2.4-3, plaatste men een speciaal gevormde anode in het midden van een glazen kolf en bedekte men de vrije wand van de kolf met een fluorescerende laag. Men stelde vast dat de geheimzinnige straling de fluorescerende laag deed oplichten en dat een schaduw van de anode op de wand werd geprojecteerd.

Uit deze en andere experimenten leidde men een aantal eigenschappen van de kathodestralen af:

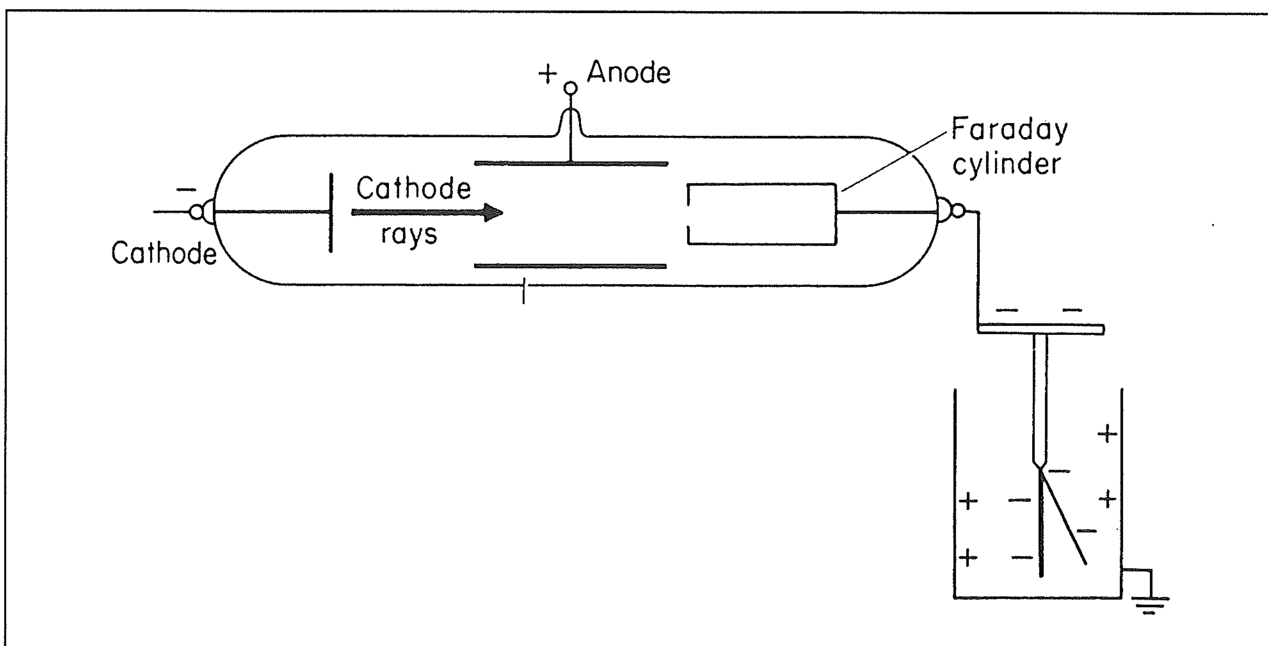
2.4 Het elektron, de basis van de elektronica



Figuur 3/2.4-3: Uit dit experiment blijkt dat de kathodestralen zich rechtlijning voort planten.

- de stralen planten zich rechtlijnig voort, want anders zou het schaduwbeeld van de anode op het scherm niet scherp zijn;
- de straling wordt afgebogen door een elektrostatisch veld;
- de straling wordt afgebogen door een magnetisch veld;
- de straling kan energie overbrengen, want als men een klein metalen plaatje in de baan van de straal zet wordt dit warm.

Een Franse professor aan de universiteit van Parijs, Jean Perrin, maakte de proefopstelling van figuur 3/2.4-4. Hiermee werd een andere zeer belangrijke eigenschap van de kathodestralen aangetoond. De anode werd nu cylindervormig in het midden van de buis aangebracht en aan het vrije uiteinde werd een extra cylindervormige elektrode ingesmolten. Deze werd verbonden met de knop van een elektroscoop. Men stelde vast dat de kathodestralen die op de elektrode invielen de elektroscoop oplaadden. Door proeven kon men vaststellen dat de elektroscoop negatief werd opgeladen. De kathodestralen zijn dus dragers van negatieve elektrische lading!

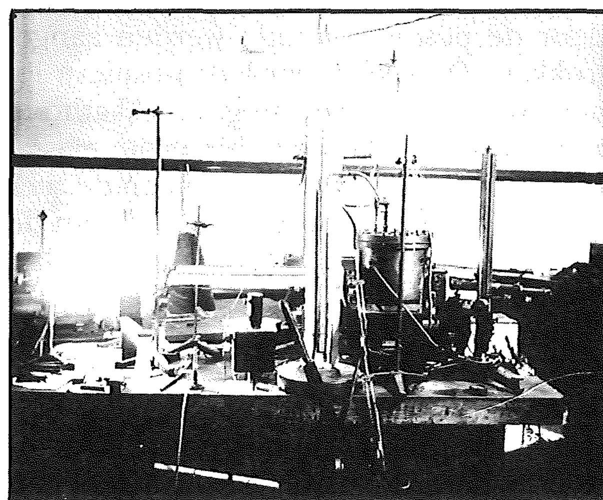


Figuur 3/2.4-4: De proef van Perrin, waaruit blijkt dat kathodestralen dragers zijn van negatieve elektrische lading.

2.4 Het elektron, de basis van de elektronica

De straling zijn deeltjes!

Men begon toen te vermoeden dat de kathodestraling geen echte straling was, maar een stroom of bundel van negatief geladen deeltjes. Dat werd experimenteel bevestigd door de Engelse wetenschapper J.J. Thomson, die tussen 1894 en 1900 een reeks interessante proeven uitvoerde. In een gasontladingsbuis bracht Thomson twee evenwijdige elektroden aan, waartussen een spanning werd gelegd. Door het elektrostatisch veld dat tussen deze twee elektroden wordt opgebouwd zal de bundel geladen deeltjes worden afgebogen. In de buis werd bovendien een magnetisch veld aangebracht. Het magnetisch veld zorgt voor een tweede afbuiging van de deeltjesbundel. Door nu beide velden zo af te regelen dat hun afbuigende werkingen elkaar opheffen en wat gereken met de reeds toen bekende formules van de magnetische en elektrostatische krachten kon Thomson vrij nauwkeurig de verhouding tussen de lading en de massa van de deeltjes bepalen. Het bleek dat deze verhouding volledig onafhankelijk was van het soort gas in de buis en dat ook de samenstelling van het kathodemateriaal er niets toe deed. Blijkbaar waren deze geheimzinnige, negatief geladen deeltjes een fundamenteel onderdeel van alle materie. De wetenschapper Millikan slaagde er tussen de jaren 1909 en 1917 in de elektrische lading van deze nieuwe deeltjes zeer nauwkeurig te meten. Daarvoor werd een zeer ingenieuze en ingewikkelde opstelling ontwikkeld, zie figuur 3/2.4-5, die klassiek is geworden in de wetenschapshistorie. Aan de hand van de gevonden waarde van de lading en de resultaten van de proeven van Thomson kon men natuurlijk ook de massa vaststellen. De lading van het deeltje was $1{,}60218.10^{-19}$ C, de massa werd vastgesteld op $9{,}10939.10^{-31}$ kg! Het nieuw ontdekte deeltje, dat elektron werd genoemd, moest dus wel onvoorstelbaar klein zijn!



Figuur 3/2.4-5: De originele opstelling van Millikan, waarmee de lading van het elektron werd gemeten.

Het atoommodel van Thomson

Aan de hand van al deze experimenteel verzamelde gegevens stelde Thomson een nieuw atoommodel op. Het atoom van Thomson bestond uit een homogeen bolletje met een positieve lading, waarin de negatief geladen elektronen waren “ingebed”. De positieve pit had net zoveel lading als de elektronen, zodat het atoom op zich elektrisch neutraal was. De pitten zaten onderling in een hecht verband en de samenstelling van dit verband bepaalde de eigenschappen van de stof. Volgens Thomson was de stof dus zeer massief, want tussen de atomen was weinig vrije ruimte. Hoewel de positieve pit en de elektronen sterk aan elkaar gebonden waren, kon het toch door uitwendige invloeden gebeuren dat een of meerdere elektronen van de pit werden losgescheurd. Er bleef dan een atoompit over met een positieve lading, die “ion” werd genoemd. Een van die uitwendige invloeden was bij-

voorbeeld het sterke elektrisch veld in de gasontladingsbuizen. Dit veld rukte de elektronen los van de pit, het gevolg was dat de kleine negatief geladen elektronen door de positieve anode werden aangetrokken. De veel zwaardere positieve ionen werden door de negatieve kathode aangetrokken. Vanwege het grote massaverschil tussen de zware ionen en de zeer lichte elektronen was de snelheid van de elektronen echter veel en veel groter dan deze van de ionen. De zeer snelle elektronenstroom veroorzaakte de kathodestraling en het oplichten van de fluorescerende schermen.

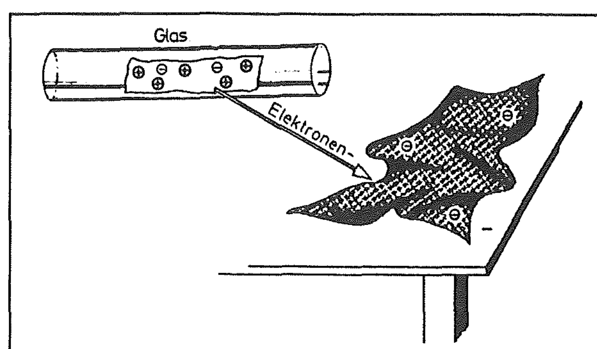
Het was natuurlijk nu ook duidelijk waarom de elektronenstraal werd afgebogen door een magnetisch of elektrisch veld. Geladen deeltjes ondergaan immers een kracht als zij zich door een elektrisch of magnetisch veld verplaatsen! Het atoommodel van Thomson kon ook de reeds lang bekende verschijnselen van elektrische oplading door wrijving verklaren. Als men, zoals getekend in figuur 3/2.4-6, een glazen staaf krachtig wrijft met een wollen doek, dan zullen hierdoor elektronen uit de glasatomen worden losgerukt. Deze komen dan in de wollen doek terecht, waardoor hierin een teveel aan negatieve lading ontstaat. De glazen staaf is nu echter elektronen kwijt en wordt dus positief geladen.

Rutherford strooit roet in het eten

Het mooie compacte atoommodel van Thomson bleek echter niet bestand tegen proeven die de Engelsman Rutherford rond 1906 uitvoerde. In 1896 werd door Becquerel het verschijnsel der radioactiviteit ontdekt.

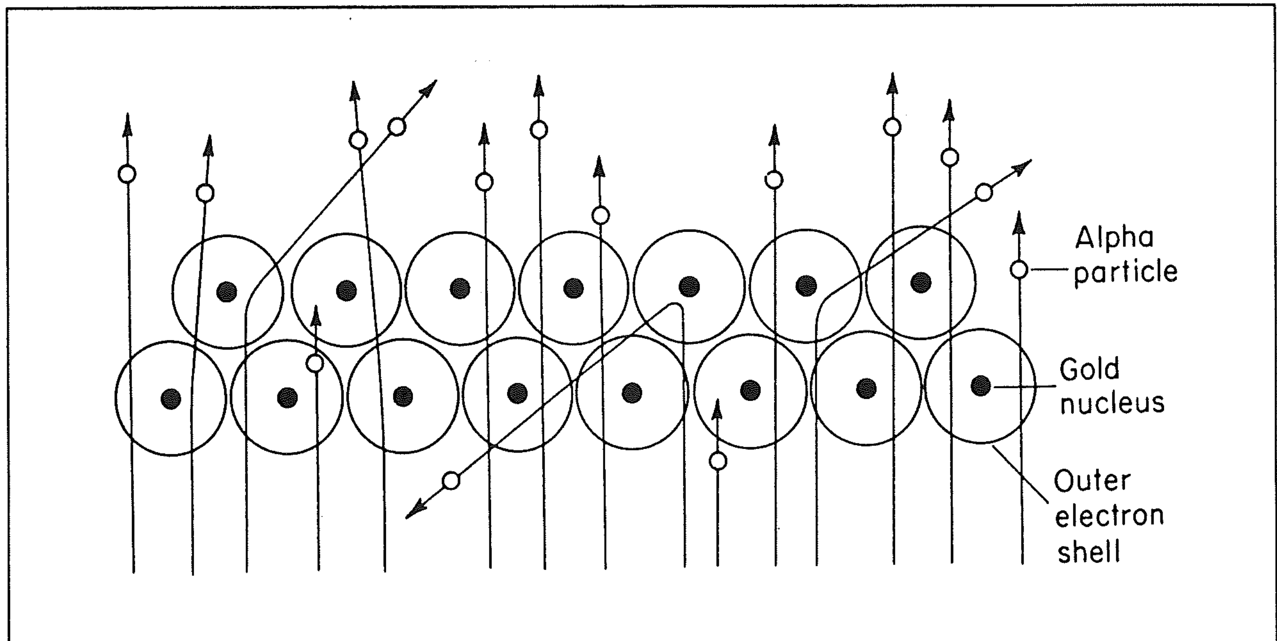
Sommige atomen zenden straling uit, die in staat is zorgvuldig tegen licht afgeschermde fotografische platen toch te belichten. Deze geheimzinnige straling dringt dus blijkbaar zonder enig probleem door een papieren afscherming heen! Eén soort straling, die men α-straling noemde, kon gemakkelijk worden gedetecteerd. Men vermoedde dat deze straling uit zware deeltjes bestaat die een positieve lading hebben. Nu weet men dat die α-straling niets anders is dan een stroom kernen van helium-atomen, die door sommige radioactieve stoffen wordt uitgezonden. Om de eigenschappen van deze nieuwe straling te onderzoeken schoot Rutherford, die aan de McGill-universiteit werkte, een bundel van deze deeltjes af op een dunne gouden folie, zie figuur 3/2.4-7. Deze folie bestond uiteraard uit goud-atomen, die men samengesteld dacht volgens het model van Thomson.

Tot grote verbazing van Rutherford bleek dat de meeste α-deeltjes zonder enige problemen door de goudfolie heen vlogen! Sommige werden weliswaar afgebogen, waarbij bovendien bleek dat de afbuigingshoeken tamelijk klein waren. Sommige α-deeltjes werden echter volledig teruggekaatst. Volgens het atoommodel van Thomson zouden de meeste α-deeltjes teruggekaatst moeten worden.



Figuur 3/2.4-6: De Thomson-verklaring van het verschijnsel van de wrijvingsoplading.

2.4 Het elektron, de basis van de elektronica



Figuur 3/2.4-7: De strooiïngsproeven van Rutherford betekenden het einde van het atoommodel van Thomson.

De deeltjes botsen immers tegen de dicht op elkaar liggende atoompitten en volgens de wetten van de mechanica ontstaat er bij die botsing een impulsoverdracht tussen deeltje en atoom, waardoor de deeltjes terug kaatsen. Uit de experimenten moest echter geconcludeerd worden dat er tussen de atomen vrij veel lege ruimte was, waardoor de meeste α-deeltjes ongehinderd door de folie konden vliegen.

Het atoommodel van Rutherford

Uit deze en andere experimenten ontwierp Rutherford in 1911 een nieuw atoommodel, dat het "planeet-model" werd genoemd. Een atoom bestaat volgens dit model uit een kleine harde kern met een positieve lading. Deze lading is gelijk aan of een geheel deel van het atoomgewicht van het atoom. Een waterstofkern (H) heeft dus een lading van +1, een zuurstofkern (O) van +8. Rond deze kern bewegen zich de negatief geladen elektronen in cirkelvormige banen. Alle elektronen hebben een lading van -1. Om het atoom elektrisch neutraal te houden cirkelen er even veel elektronen rond de kern als er positieve eenheidsladingen in de kern aanwezig zijn. Een waterstofatoom moet het dus stellen met slechts één elektron, een zuurstofatoom beschikt over 8 elektronen. Het grootste gedeelte van een atoom bevat dus niets anders dan lege ruimte, hetgeen verklaart waarom radioactieve straling zonder merkbare verzwakking door een dunne goudfolie kan dringen. De massa van het atoom zit voor het grootste deel geconcentreerd in de kern, de lichte elektronen dragen nauwelijks bij aan de massa.

Dit planeetmodel kon weer een heleboel fysische verschijnselen verklaren en had natuurlijk erg veel gelijkenis met de samenstelling van een zonnestelsel. Zoiets spreekt natuurkundigen, die immers uit filosofische overwegingen overtuigd zijn dat de natuur zichzelf in allerhande struc-

2.4 Het elektron, de basis van de elektronica

turen steeds herhaalt, erg aan! Het atoommodel van Rutherford, voor enige elementen getekend in figuur 3/2.4-8, leek dan ook de definitieve verklaring van de bouw van de materie te zijn.

Door statistische metingen uit te voeren en te tellen hoeveel α-deeltjes er door een folie vliegen en hoeveel er worden teruggekaatst kon Rutherford vrij nauwkeurig de straal van een atoom en de straal van de kern berekenen. De straal van het atoom bleek ongeveer 10^{-8} cm te zijn, de straal van de kern slechts 10^{-12} cm! De kern is dus 10.000 keer kleiner dan de diameter van het atoom, waaruit duidelijk blijkt dat materie heel ijl is en het heelal, de planeet aarde en ook wijzelf hoofdzakelijk uit niets bestaan. Dat, ondanks deze ijlheid, materie toch ongelooflijk stevig en hard kan zijn, heeft te maken met de grote krachten die in het atoom en tussen de atomen werkzaam zijn en de deeltjes stevig op hun plaats houden.

Verfijningen
Vele wetenschappers hebben jaren van hun leven besteed aan het aanbrengen van verfijningen in het atoommodel van Rutherford. Zo kon men experimenteel aantonen dat de elektronen niet zo maar rond de kern draaien, maar in welbepaalde cirkelvormige banen. Die banen noemt men de "schillen" van het atoom en het blijkt dat iedere schil maar een beperkt aantal elektronen kan bevatten. Er bestaan zes schillen, zie figuur 3/2.4-9, die worden aangeduid met de letters K, L, M, N, O, P en Q.
Het maximaal aantal elektronen op iedere schil wordt gegeven door de eenvoudige wiskundige uitdrukking:

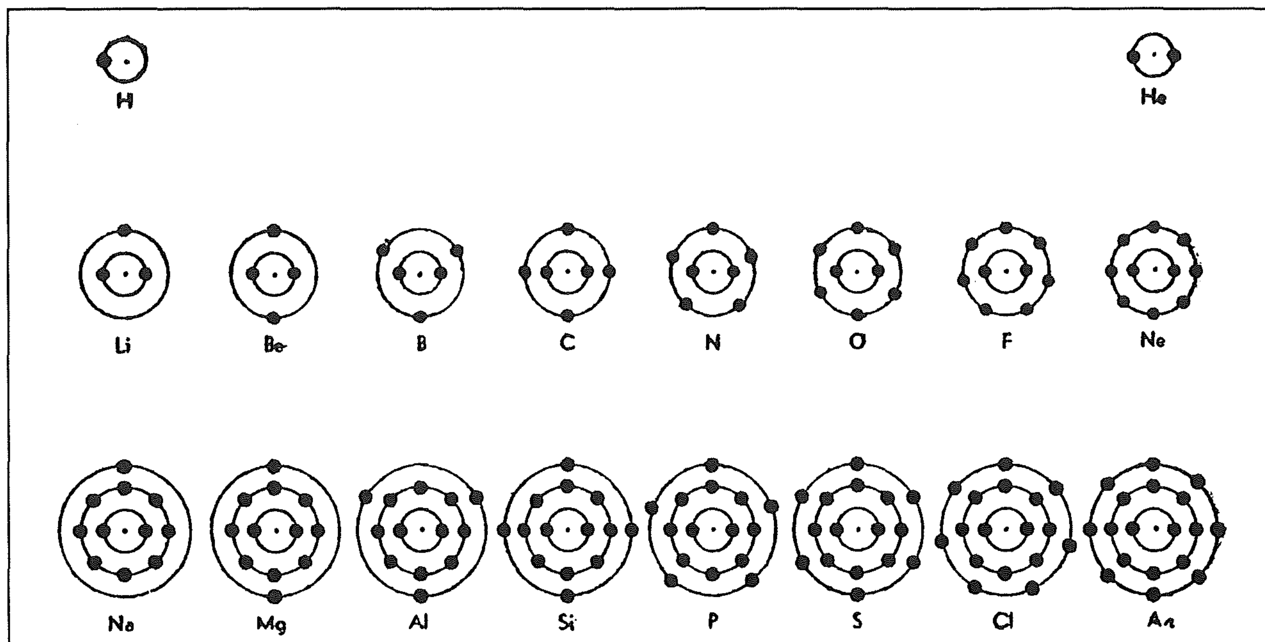
$$n = 2.Z^2$$

waarin Z het volgnummer van de schil voorstelt, gerekend van binnen naar buiten. Schil K heeft dus Z = 1, schil N heeft Z = 4. Overigens geldt deze formule maar voor de schillen K, L, M en N. Nadien neemt het aantal elektronen weer af, maar wel volgens dezelfde reeks.
Een en ander betekent dus:
- schil K bevat maximaal 2 elektronen;
- schil L bevat maximaal 8 elektronen;
- schil M bevat maximaal 18 elektronen;
- schil N bevat maximaal 32 elektronen;
- schil O bevat maximaal 18 elektronen;
- schil P bevat maximaal 8 elektronen;
- schil Q bevat maximaal 2 elektronen.

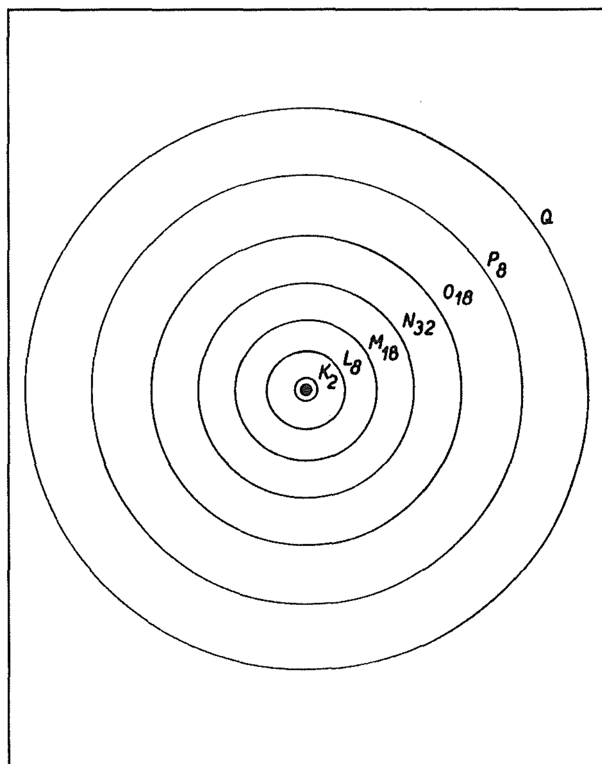
In totaal kan een atoom dus 88 elektronen bevatten, althans volgens dit model.

Atoombindingen
Dank zij het atoommodel van Rutherford kan men ook heel eenvoudig verklaren hoe atomen onderlinge bindingen aangaan en nieuwe stoffen vormen. In figuur 3/2.4-10 is bijvoorbeeld getekend hoe twee atomen waterstof (H) een verbinding aangaan met één atoom zuurstof (O) om één molecuul water (H_2O) te vormen.
Waterstof heeft slechts één elektron in de K-schil. In die schil kunnen er echter twee rond draaien. Zuurstof heeft zes elektronen in de L-schil, maar deze schil kan 8 elektronen bevatten. Als nu twee H-atomen botsen met één O-atoom, grijpen de buitenste banen van de elektronen in elkaar, waardoor een soort van gecombineerde baan ontstaat. De elektronen van de twee H-atomen gaan beurtelings om hun eigen kern draaien en om de zuurstofkern, zodat de L-schil van het O-atoom nu schijnbaar acht elektronen bevat. Atomen lijken er dus naar te streven hun schillen met het maximaal aantal elektronen te vullen!

2.4 Het elektron, de basis van de elektronica



Figuur 3/2.4-8: Het atoommodel van Rutherford, toegepast op de elementen waterstof (H) tot en met Argon (Ar).



Figuur 3/2.4-9: De zeven schillen rond de kern van een atoom, waarop de elektronen volgens het model van Rutherford hun rondjes draaien.

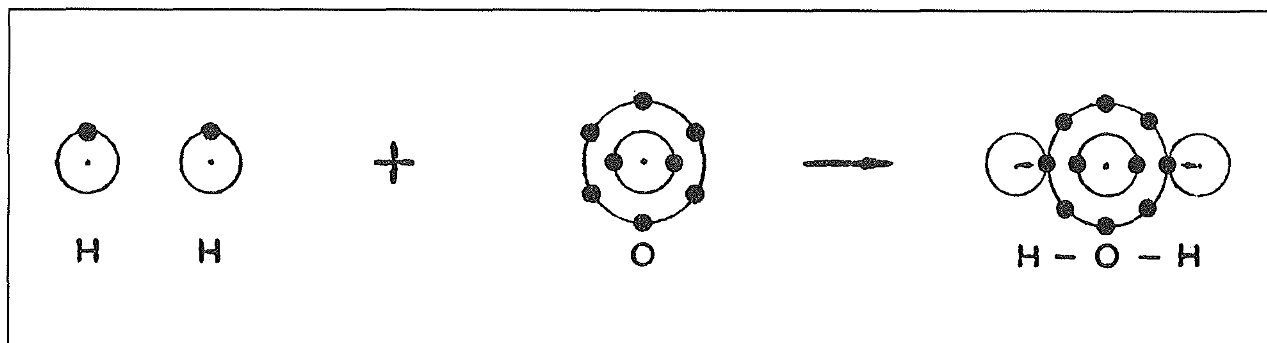
Te mooi om waar te zijn!

Ondanks het feit dat het atoommodel van Rutherford een heleboel fysische verschijnselen uitstekend kon verklaren, waren er toch enige problemen.

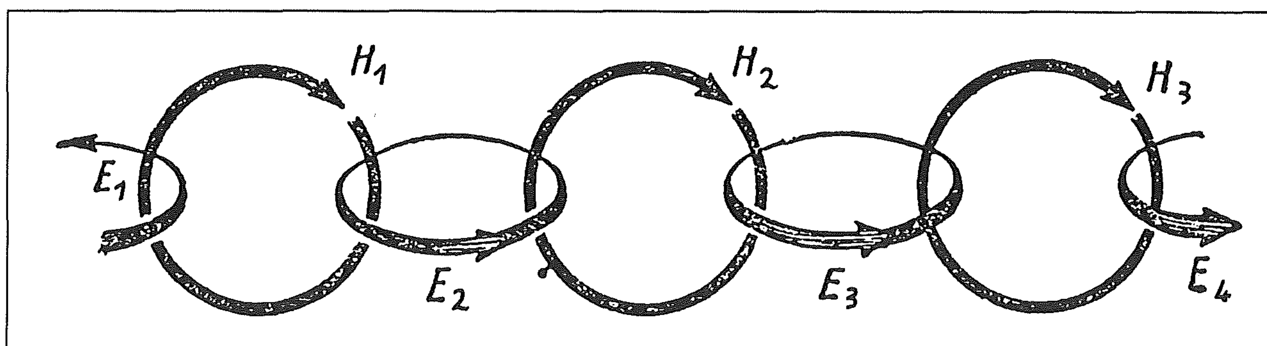
Het eerste probleem was dat volgens de elektromagnetische theorie die door Maxwell aan het eind van de negentiende eeuw werd opgesteld een elektrische lading in beweging per definitie elektromagnetische energie uitstraalt. Zie hoofdstuk 3/2.12 voor een nadere verklaring. Maar als die elektronen op hun banen dat zouden doen, dan zouden zij continu energie verliezen en daardoor binnen de kortste keren neerstorten op de kern van het atoom.

Rutherford kon absoluut niet verklaren hoe de elektronen op hun constante banen bleven bewegen. Het tweede probleem was dat het model niet kon bewijzen waarom elektronen maar op bepaalde schillen rond de kern van het atoom kunnen cirkelen.

2.4 Het elektron, de basis van de elektronica



Figuur 3/2.4-10: De verklaring van atoombindingen volgens het model van Rutherford.



Figuur 3/2.4-11: De voorstelling van een elektromagnetisch golfverschijnsel in de ruimte.

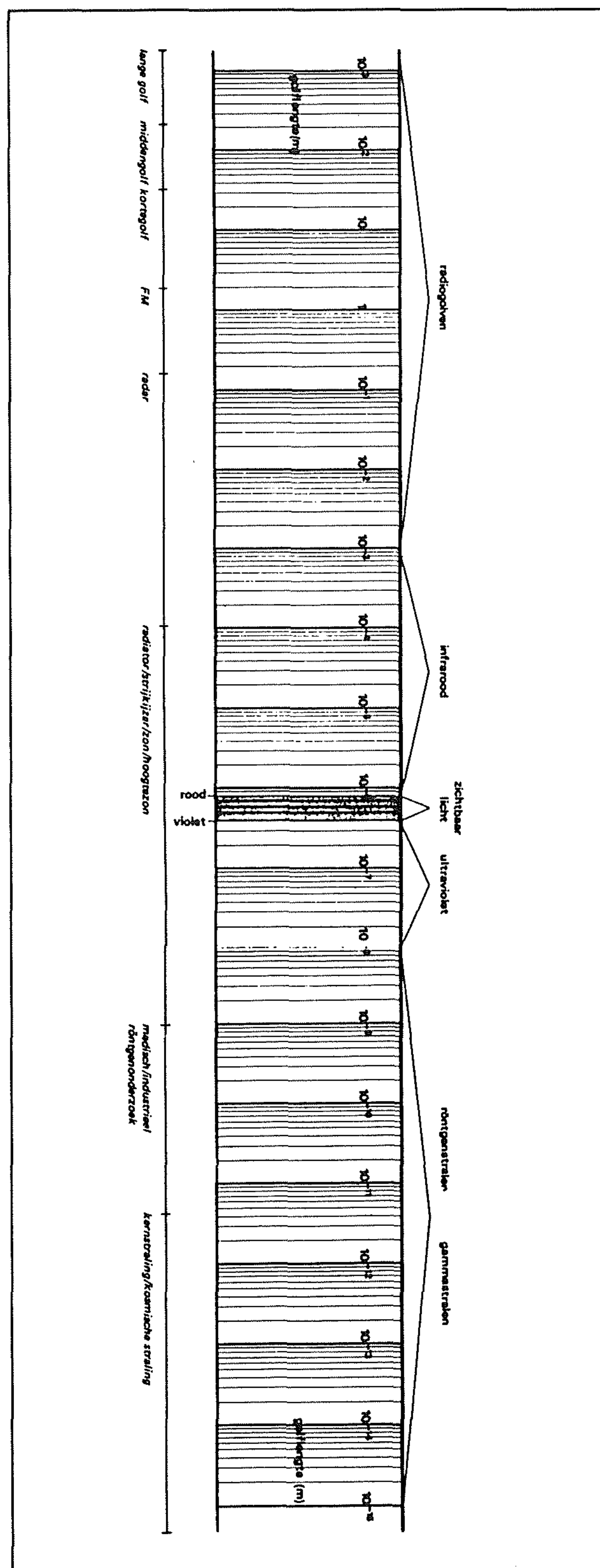
In principe belet niets een elektron om een willekeurige baan op te zoeken. Toch was de aanwezigheid van de schillen ondubbelzinnig experimenteel aangetoond. Een derde probleem, hiermee samenhangend, was dat men kon aantonen dat atomen, onder bepaalde omstandigheden, elektromagnetische straling met zeer specifieke golflengtes uitzenden. Dit verschijnsel wordt uitvoerig behandeld in het volgende subhoofdstuk. Die specifieke golflengtes kunnen niet verklaard worden door het model van Rutherford.

Stralende elektronen

Elektromagnetische golven

In de loop van de negentiende eeuw had men een goed inzicht gekregen in de structuur van licht. Licht, zo wist men, was een onderdeel van het elektromagnetisch stralingsspectrum. Straling die ontstaat doordat magnetische en elektrische velden een wisselwerking met elkaar aangaan. Zoals men weet (zie hoofdstuk 3/2.3, blz. 10) veroorzaakt een variërend elektrisch veld een variërend magnetisch veld. Dit veld veroorzaakt dan weer een variërend elektrisch veld, etc. Die gecombineerde veldtrillingen veroorzaken een golfverschijnsel in de ruimte, een elektromagnetische golf. Die golf wordt gekenmerkt door een golflengte λ, die wordt uitgedrukt in meter. In figuur 3/2.4-11 is een poging gewaagd zo'n elektromagnetisch golfverschijnsel voor te stellen.
De elektrische (E) en magnetische (H) golftrillingen veroorzaken veldlijnen in de ruimte. Deze kunnen cirkelvormig worden voorgesteld.

2.4 Het elektron, de basis van de elektronica



Figuur 3/2.4-12: Het elektromagnetisch spectrum.

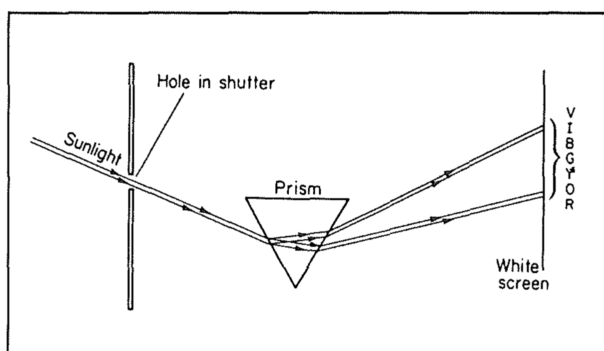
De elektrische ruimtelijke veldlijnen E1 veroorzaken een magnetische inductie, die zich uit onder de vorm van magnetische ruimtelijke veldlijnen H1. Deze staan loodrecht op de elektrische veldlijnen. De magnetische veldlijnen H1 veroorzaken weer elektrische inductie, die zich uit onder de vorm van de elektrische veldlijnen E2. Deze veroorzaken weer magnetische inductie, met als gevolg ruimtelijke magnetische veldlijnen H2. De twee verschijnselen planten zich loodrecht ten opzichte van elkaar door de ruimte voort. De snelheid waarmee dit gebeurd is gelijk aan 299.792,5 km/s! Dat betekent dat een elektromagnetische golf in één seconde ongeveer 7,5 keer rond de aarde kan reizen!

Het zichtbare licht vormt maar een heel klein gedeelte van het elektromagnetisch spectrum. Het volledige spectrum is getekend in figuur 3/2.4-12. Radio-, TV- en radar-golven vormen het gebied met de lange golflengten, van ongeveer 1.000 m tot ongeveer 1 mm. Nadien volgt het infrarode gebied, elektromagnetische warmtestraling die iedereen kent van de zon, de hoogtezon en elektrische radiatoren. Nadien komt het uiterst smalle gebiedje van het zichtbare licht. Het rode licht heeft de langste golflengte, het violette licht de kortste. Vervolgens komt het gebied van de ultraviolette straling, gevaarlijk voor de menselijke huid. Bij nog kortere golflengtes (dan moet men denken aan 10^{-8} m) spreekt men van röntgenstraling, bekend van het ziekenhuis en gammastraling, die erg gevaarlijk is voor de gezondheid.Hoewel al deze soorten straling nogal verschillend lijken, is de basis steeds hetzelfde: een zich in de ruimte met constante snelheid voortplantende interactie van elektrische en magnetische veldlijnen.

2.4 Het elektron, de basis van de elektronica

Samengestelde straling

Sommige bronnen van elektromagnetische straling zenden slechts één welbepaalde golflengte uit, bijvoorbeeld een ongemoduleerde radio-zender. Deze zendt een signaal uit waarin men alleen de golflengte van de hoogfrequente draaggolf zal aantreffen. De meeste elektromagnetische bronnen zenden echter een samengesteld signaal uit, waarin verschillende golflengten aanwezig zijn. Een typisch voorbeeld is de zon, die elektromagnetische straling uitzendt van ver in het infrarode tot ver in het ultraviolette gebied. Men heeft apparaten ontwikkeld waarmee men de golflengte-samenstelling van dergelijke straling kan onderzoeken. Deze apparaten noemt men "spectroscopen".



Figuur 3/2.4-13: De eenvoudigste spectroscoop is een glazen prisma, waarmee het witte licht van de zon ontleed kan worden in zijn gekleurde componenten.

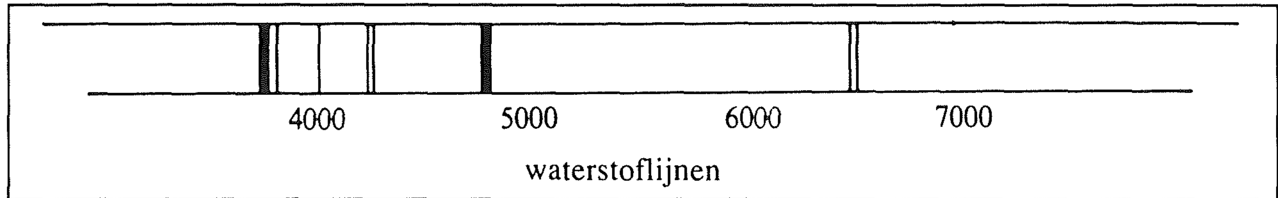
De eenvoudigste spectroscoop is een glazen prisma, waarmee men het zonlicht kan ontleden. Zoals in figuur 3/2.4-13 getekend is, bestaat de opstelling uit een licht ondoorlatende plaat, waarin een klein gaatje is aangebracht. Via dit gaatje valt het zonlicht op een glazen prisma. De elektromagnetische straling van de zon wordt door dit prisma gebroken. Iedere golflengte heeft echter een andere brekingshoek. Het gevolg is dat de smalle invallende witte zonnestraal wordt omgezet in een brede bundel, waarin men alle kleuren van de regenboog herkent. Als men deze bundel op een wit scherm projecteert ziet men de prachtige kleuren van de individuele golflengtes van het zonlicht, van diep rood (beneden) tot violet (boven). Via ingewikkelder apparatuur is het ook mogelijk de voor de mens niet zichtbare elektromagnetische straling te ontleden in de samenstellende golflengten.

Atomen en straling

Als men waterstofgas opsluit in een gasontladingsbuis en over de buis een grote gelijkspanning aanlegt zal het waterstofgas, zoals reeds beschreven, licht uitstralen. Als men dit elektromagnetisch verschijnsel door middel van een spectroscoop gaat ontleden stelt men iets merkwaardig vast. Zoals getekend in figuur 3/2.4-14 bestaat het elektromagnetisch spectrum dat door waterstof wordt uitgestraald niet uit een continu spectrum, zoal bij het zonlicht, maar uit welbepaalde golflengtes. De golflengteschaal is in deze tekening overigens geijkt in Å (Ångström, gelijk aan 10^{-10}m of 0,1 nm), een niet officiële eenheid die toch nog vaak wordt gebruikt.

Ieder lijntje in de tekening stelt een welbepaalde golflengte voor uit het opgevangen en geanalyseerd waterstoflicht. Het blijkt dat alle stoffen een dergelijk lijnenspectrum bezitten. De verdeling van de lijnen is zelfs zo specifiek voor een stof dat men deze als een soort vingerafdruk van de stof kan beschouwen.

2.4 Het elektron, de basis van de elektronica



Figuur 3/2.4-14: Het elektromagnetisch spectrum van waterstof.

De oorsprong van de lijnen

De vraag die natuurkundigen moesten beantwoorden was waar deze typisch lijnen vandaan kwamen. Na was reeds bekend dat voor het uitzenden van elektromagnetische straling energie nodig is. De enige voorwerpen in een atoom die dergelijke energie bezitten zijn de elektronen, die immers met grote snelheid (en dus energie) rond de kern draaien. Zouden de elektronen echter de elektromagnetische straling uitzenden, dan zouden zij energie (en dus snelheid) verliezen. Het gevolg zou zijn dat de elektronen dichter rond de kern gingen draaien en tot slot zelfs op de kern zouden neerstorten. Dat is duidelijk in strijd met de waarnemingen!

De theorie van Bohr

De Deense natuurkundige Niels Bohr ontwikkelde rond 1914 een theorie die deze vreemdsoortige lijnenspectra kon verklaren. Bohr had in zijn studietijd samengewerkt met Thomson en met Rutherford en kende de bestaande atoommodellen als de inhoud van zijn broekzak. Maar hij was dus ook goed op de hoogte van de problemen rond deze modellen. Bohr stelde nu een nieuwe atoomtheorie samen, die in feite mooi aansloot op het planetair model van Rutherford, maar een verklaring gaf voor de stationaire banen van de elektronen en voor het uitzenden van de lijnenspectra.

Bohr stelde:

- Elektronen kunnen alleen op welbepaalde banen rond de kern draaien (niets nieuws!). Door gebruik te maken van bepaalde stellingen van de quantum-mechanica van Max Planck kon Bohr echter de stralen van deze banen berekenen. En dat was wél nieuw, want daarmee was de vraag naar het waarom van de waargenomen schillen opgelost.
- In strijd met alles wat de elektromagnetische theorie van Maxwell beweert zenden de elektronen op deze banen géén energie uit. Bohr loste deze tegenstelling op door te beweren dat de traditionele elektromagnetische theorie niet van toepassing was in de kleine schaal structuur van een atoom. Zij kunnen dus tot in de eeuwigheid rustig doorgaan met op deze banen te draaien, omdat dit stationaire toestanden voor het atoom zijn. Deze stationaire schillen noemt men de "Bohr-banen" van de elektronen. Elektronen zullen dus bij voorkeur een plekje op een van de Bohr-banen opzoeken, omdat dit de meest stabiele toestand van het atoom is.
- Iedere baan of schil komt overeen met een welbepaalde rust-energie van de elektronen. Deze energie hangt af van de afstand tussen de kern en de schil.
- Als er extra energie aan het atoom wordt toegevoegd, bijvoorbeeld door het op te warmen of aan een sterk elektrisch veld bloot te stellen, kunnen elektronen deze energie absorberen. Zij

2.4 Het elektron, de basis van de elektronica

zijn dan in staat naar een baan of schil te springen die een hogere rust-energie heeft. Voorwaarde is dan wel dat er voldoende energie aan het atoom is aangeboden om het verschil in rust-energie tussen beide schillen te overwinnen. Een elektron dat door toevoeging van extra energie zijn stationaire Bohr-baan verlaten heeft noemt men een "aangeslagen" elektron.

- Op dat moment is het atoom in een instabiele toestand. Het aangeslagen elektron zal zo snel mogelijk terug vallen naar zijn stationaire Bohr-baan. Hierbij zendt het elektron echter weer een hoeveelheid energie uit onder de vorm van elektromagnetische straling. De uitgezonden hoeveelheid energie is gelijk aan het verschil in rust-energie tussen beide schillen. De overgang van een elektron van aangeslagen toestand naar stationaire Bohr-toestand noemt men een "quantum-sprong".

Met deze stellingen kon Bohr het uitzenden van lijnenspectra verklaren. Iedere golflengte in het spectrum komt immers overeen met de sprong van een aangeslagen elektron van een buitenste schil naar een binnenste schil. Omdat er heel wat sprongen tussen de zes schillen mogelijk zijn, kan men dus ook heel wat golflengte-lijnen in een spectrum verwachten.

De theorie klopt!

Het was mogelijk de energieën te berekenen die overeen komen met alle mogelijke quantum-sprongen van een aangeslagen elektron. Als men de energie weet die bij zo'n sprong vrijkomt, dan kan men ook de daarmee overeen komende golflengte van de elektromagnetische straling berekenen. Hoe hoger de energie die vrijkomt, hoe kleiner de golflengte van de opgewekte straling. Iedere quantum-sprong genereert dus één golflengte-lijn in het lijnenspectrum van het atoom dat men onderzoekt. Nadien hebben talloze experimentele natuurkundigen geprobeerd alle lijnen terug te vinden die volgens de theorie van Bohr met alle mogelijke quantum-sprongen overeen komen. In figuur 3/2.4-15 zijn de namen vermeld van de wetenschappers die de lijnstructuur van waterstof volledig ontrafeld hebben. Bovendien is aangegeven welke golflengtes van welke quantum-sprongen zij waargenomen hebben.

Het belang voor de elektronica

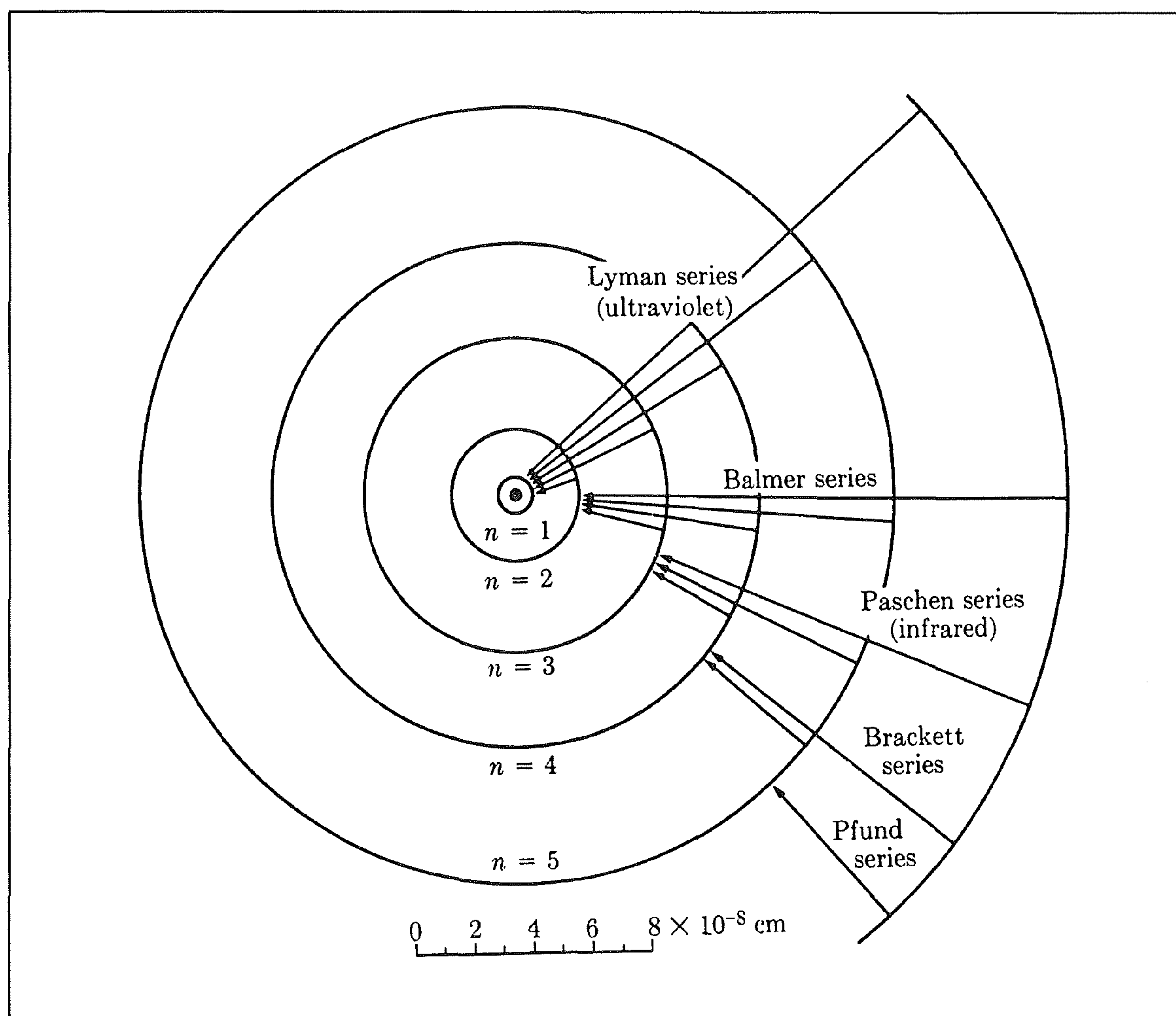
Het zal duidelijk zijn dat de beschreven natuurkundige eigenschappen van het atoom van zeer groot belang zijn voor de elektronica. Van het feit dat elektronen elektromagnetische straling produceren als zij van een aangeslagen in een stationaire toestand terug vallen wordt in tal van elektronische onderdelen gebruik gemaakt. Te denken valt aan:

- beeldbuizen;
- LED's;
- luminiscerende panelen;
- indicatorbuizen.

Bij al deze onderdelen worden eerst door het toevoegen van externe energie de atomen in aangeslagen toestand gebracht, zie figuur 3/2.4-16. Nadien zullen elektronen terug vallen naar hun Bohr-baan en daarbij elektromagnetische straling van een bepaalde golflengte uitstralen.

Op dit moment heeft men een zo goed inzicht in deze fysische processen, dat men zuiver theoretisch kan berekenen aan welke eigenschappen de stoffen moeten voldoen om een bepaalde kleur van het licht te verkrijgen. Het komt er nadien alleen op aan de noodzakelijke grondstoffen op een reproduceerbare en goedkope manier op industriële schaal te maken.

2.4 Het elektron, de basis van de elektronica



Figuur 3/2.4-15: Overzicht van de mogelijke quantum-sprongen van een aangeslagen elektron in een waterstof atoom.

Het atoommodel van Sommerfeld

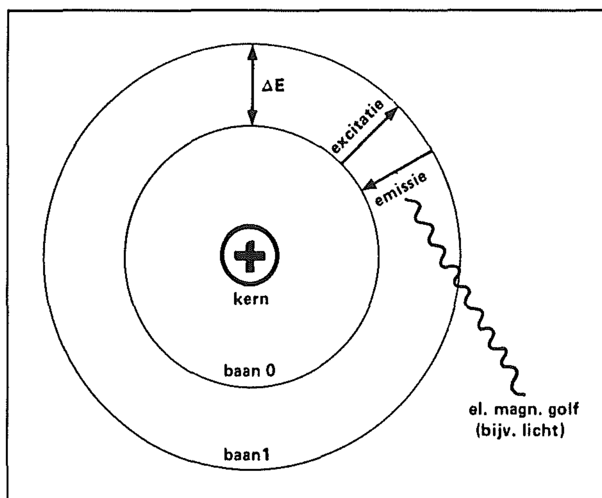
Toen de wetenschap de beschikking kreeg over zeer nauwkeurige spectroscopen en men hiermee de spectrale lijnen van waterstof grondig ging onderzoeken, bleek dat de enkelvoudige lijnen in feite waren samengesteld uit verschillende lijnen, die heel dicht bij elkaar lagen. Dit noemde men de "fijnstructuur" van het spectrum.

De theorie van Bohr had hiervoor geen verklaring. Die verklaring werd door Sommerfeld geleverd. Deze veronderstelde dat elektronen niet alleen in cirkelvormige banen rond de kern kunnen draaien, maar ook in elliptische. Er zijn dan, per schil, veel meer rust-energieën mogelijk, met als gevolg ook veel meer overgangen van schil naar schil. De rust-energieën in een ellipsvormige baan liggen echter zeer dicht bij elkaar en dus ook de golflengtes van de uitgezonden elektromagnetische straling. Door zeer nauwkeurig onderzoek van de fijnstructuur stelde Sommer-

2.4 Het elektron, de basis van de elektronica

feld het model op dat is toegelicht in figuur 3/2.4-17:

- de K-schil heeft één cirkelvormig baan;
- de L-schil heeft één cirkelvormige en één ellipsvormige baan;
- de M-schil heeft één cirkelvormige en twee ellipsvormige banen;
- etc.

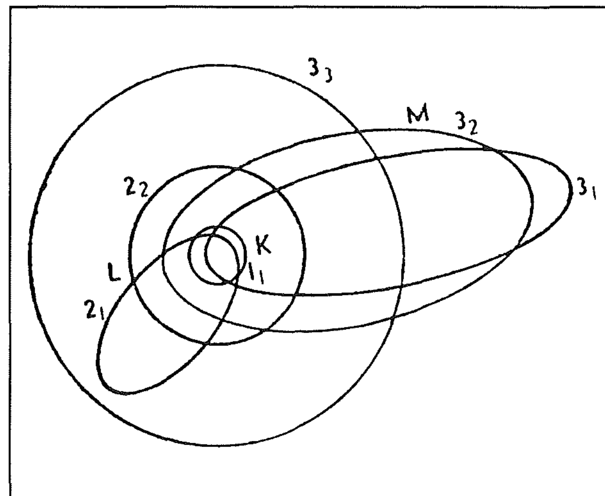


Figuur 3/2.4-16: De basis van de optische elektronica: een elektron wordt eerst "geëxiteerd" van baan 0 naar baan 1 en zal nadien terug vallen naar zijn stationaire baan. Op dat moment wordt elektromagnetische straling met een welbepaalde golflengte uitgestraald.

In iedere baan kunnen natuurlijk weer slechts een bepaald aantal elektronen voorkomen. Het totaal per schil blijft echter gelijk aan dat wat Rutherford reeds stelde. Deze verfijning van het model van Bohr biedt, zoals later zal blijken, ook een eenvoudige verklaring voor de elektrische geleidbaarheid van sommige stoffen.

Epiloog

Het atoommodel van Sommerfeld is de meest verfijnde benadering van de natuurkundige realiteit van het atoom waar de klassieke mechanica toe in staat is. Toch laat ook dit model vele vragen open. Een groot deel van deze vragen kan beantwoord worden als men het atoom niet langer beschouwt als een soort miniatuur zonnestelsel met harde materie-bolletjes, maar als een samenhang van materievelden. De quantummechanica biedt hiertoe de theoretische, volledig wiskundig beschreven basis. Maar deze ingewikkelde theorie valt volledig buiten het bestek van deze cursus! Voor het begrijpen van de natuurkundige basis van de elektronica kan men volledig terug vallen op het atoommodel van Sommerfeld.



Figuur 3/2.4-17: Door het invoeren van ellipsvormige banen in de schillen loste Sommerfeld het probleem van de fijnstructuur van het spectrum op.

Niet behandeld is bovendien de samenstelling van de atoomkern, omdat dit voor de elektronica niet belangrijk is. Voor de volledigheid wordt alleen even vermeld dat de kern bestaat uit protonen en neutronen. De protonen zijn de dragers van de positieve elektrische lading en ieder

atoom bevat even veel protonen als elektronen.
De neutronen zijn niet geladen, maar hebben wel een aanzienlijke massa. Vanwege hun elektrische neutraliteit vervullen neutronen geen enkele rol in elektrische en elektronische verschijnselen.

Vrije elektronen

Inleiding

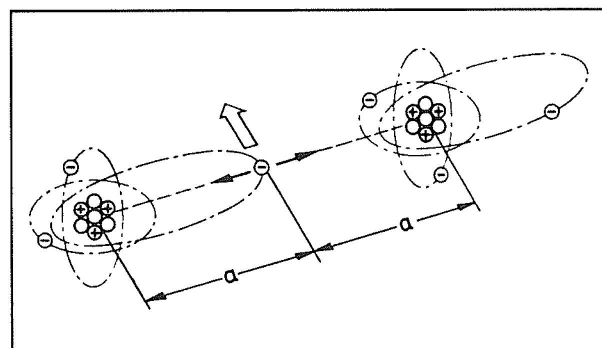
Elektronen zijn de basis van de elektrische stroom. Elektrische stroom bestaat immers uit een verplaatsing van een grote hoeveelheid elektronen in een welbepaalde richting. Maar zolang elektronen gebonden zijn aan een atoomkern kan er van het vloeien van elektrische stroom geen sprake zijn. De volgende vraag die dus beantwoord moet worden is hoe elektronen aan hun atoomgevangenis kunnen ontsnappen. Ook dat heeft meestal te maken met het toevoeren van voldoende energie aan een atoom. Net zoals een elektron van zijn Bohrse baan naar een verder gelegen baan kan worden verplaatst, kan dat elektron ook zodanig versneld worden, dat het uit het atoomverband ontsnapt.
De hoeveelheid energie die hiervoor nodig is noemt men de "uittreed-energie", voorgesteld door het symbool φ. Het verschijnsel van het uittreden van elektronen noemt men "emissie".
De uittreed-energie is van een groot aantal omstandigheden afhankelijk. In het algemeen geldt dat atomen die een volledig gevulde hoogste schil hebben, aanzienlijk meer energie moeten absorberen om een elektron te laten ontsnappen dan atomen waarbij de laatste schil zo goed als leeg is.

Extern elektrisch veld

Een tweede voorwaarde voor het vloeien van elektrische stroom is dat er een elektrisch veld aanwezig is over de geleider. In sommige stoffen, zoals metalen, zijn de buitenste elektronen zo zwak aan hun atoom gebonden dat zij van atoom naar atoom kunnen zwerven. Toch veroorzaken deze reeds vrije elektronen geen elektrische stroom! Het is immers niet voldoende de elektronen te bevrijden uit hun atomen. Zonder extern elektrisch veld zouden deze elektronen als een soort wolk willekeurige bewegingen uitvoeren van atoom tot atoom. Maar door het aanleggen van een extern elektrisch veld zullen de vrije elektronen aangetrokken worden door de positieve lading van het veld, waardoor de elektronenstroom op gang komt.

Vrije elektronen in geleiders

In figuur 3/2.4-18 is getekend hoe men zich het ontstaan van vrije elektronen in een goede geleider volgens het atoommodel van Sommerfeld kan voorstellen.



Figuur 3/2.4-18: Het ontstaan van vrije elektronen in geleiders.

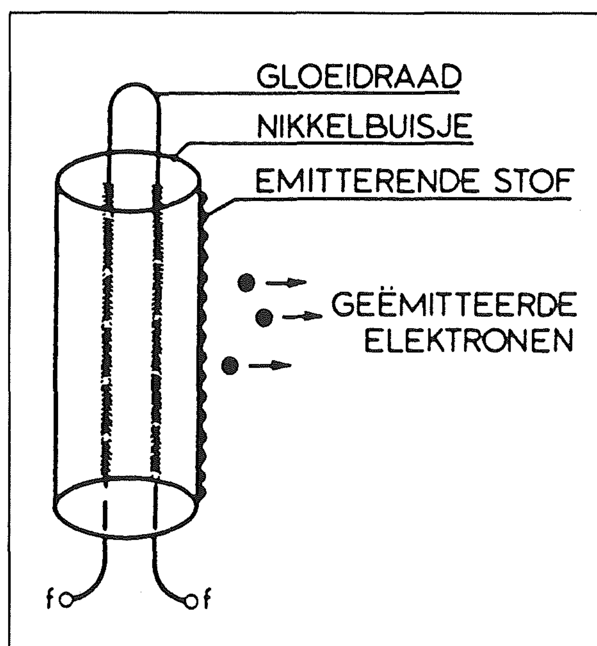
In metalen liggen de atomen dicht op elkaar. Een van de elektronen van het onderste atoom zit in een elliptische baan van de laatste schil. Op bepaalde momen-

2.4 Het elektron, de basis van de elektronica

ten bevindt dit elektron zich dus op een afstand a van de eigen kern. Door de dichtheid van de atomen bevindt dit elektron zich op dat moment echter op een identieke afstand a van een naburig atoom (het bovenste). Op dat moment kan het elektron zonder veel moeite overspringen van het ene naar het andere atoom. Dat verschijnsel gebeurt natuurlijk niet eenmalig, maar miljarden keer per seconde. Miljarden elektronen bewegen zich dus van atoom naar atoom door de stof. Zonder externe invloeden is deze beweging chaotisch en gemiddeld bekeken verandert er niets. Legt men nu echter een kleine elektrisch spanning aan over het metaal, dan ontstaat over de geleider een elektrisch veld. Dit veld oefent een kracht uit op de vrije elektronen, waardoor deze in een door de richting van het veld bepaalde richting gaan bewegen. De chaotische beweging wordt gestructureerd. Dit verschijnsel plant zich razendsnel door het metaal voort, met als gevolg dat er een stroom van elektronen van de negatieve naar de positieve pool op gang komt. De zware kernen zitten vast in hun kristalstructuur en kunnen zich niet verplaatsen. In een geleider zijn het dus alleen de zeer lichte vrije elektronen die de elektrische stroom veroorzaken.

Thermische emissie

De meest voorkomende manier om elektronen uit hun atoomstructuur te bevrijden is de thermische emissie. Warmte uit zich op microscopische schaal doordat de bouwstenen van de stof gaan trillen. Deze bewegingen gaan natuurlijk gepaard met toename van de energie. Als dus atomen warm worden, die een zeer lage uittreedenergie hebben, dan zal de opwarming al voldoende extra energie aan de elektronen geven om deze uit hun atoomverband te bevrijden. Het volstaat dan een uitwendig elektrisch veld aan te leggen om de elektronenstroom te laten vloeien. Nu moet men bij het begrip opwarming niet denken aan het heet stoken van een stof. In de natuurkunde verstaat men onder opwarmen het verhogen van de temperatuur van een stof boven het absolute nulpunt van -273,16 °C. Een stof die op een temperatuur staat van -200 °C is, natuurkundig bekeken, dus al flink opgewarmd! De thermische emissie is de oorzaak van het verschijnsel dat de lekstroom van halfgeleiders toeneemt naarmate het kristal warmer wordt. Thermische emissie wordt bovendien in beeldbuizen gebruikt om de elektronen te genereren, waaruit de elektronenstraal wordt opgebouwd. Door middel van een gloeidraad of filament, zie figuur 3/2.4-19, wordt de kathode heet (deze keer letterlijk op te vatten!) gestookt.



Figuur 3/2.4-19: Thermische emissie in de kathode van een beeldbuis wekt een wolk vrije elektronen op.

2.4 Het elektron, de basis van de elektronica

De wolk vrije elektronen die door de kathode wordt uitgezonden wordt door middel van ingewikkelde eletrostatische en magnetische lenzen en versnellers omgezet in een zeer dunne elektronenstraal, die door de luchtledige glazen beeldbuis op het scherm wordt gericht.

Foto-emissie
De noodzakelijke uittreed-energie kan ook worden aangeboden onder de vorm van elektromagnetische straling. Uit de algemene wetten van het elektromagnetisme is bekend dat de energie van de straling omgekeerd evenredig is met de golflengte. Bestraalt men dus een stof met elektromagnetische straling waarvan men de golflengte continu laat dalen, dan zal er een moment optreden waarbij de straling zoveel energie in de atomen van de bestraalde stof pompt, dat elektronen uit hun atoomverband kunnen ontsnappen. Het aanleggen van een extern elektrisch veld volstaat dan weer om de bevrijde elektronen in één richting door de stof te laten vloeien. Foto-emissie is de natuurkundige basis van een aantal elektronische onderdelen, zoals foto-dioden, fototransistoren en cadmium-sulfide cellen (LDR's).

Secundaire emissie
Elektronen kunnen ook uit hun atomen bevrijd worden door de stof te bombarderen met zeer energierijke elektronen. Deze elektronen botsen tegen de aan atomen gebonden elektronen. Bij een botsing vindt er steeds energie-overdracht plaats. Sommige gebonden elektronen worden hierdoor zo energierijk dat zij uit het atoomverband kunnen ontsnappen. Als de energie van de invallende elektronen zo groot is dat zij in staat zijn meerdere elektronen uit hun atomen te bevrijden, spreekt men van "secundaire multiplicatie". Dit effect treedt bijvoorbeeld op in fotovermenigvuldigers, waar men eerst via foto-emissie enkele elektronen bevrijd uit een plaat. Nadien worden deze elektronen versneld door een elektrisch veld. De versnelde elektronen laat men dan tegen een tweede plaat botsen.
De primaire elektronen zijn ondertussen zo energierijk door de versnelling geworden, dat zij in staat zijn met verschillende gebonden elektronen te botsen en deze uit hun atomen te bevrijden. Door het beschreven proces herhaalde malen te herhalen kan men een secundaire multiplicatie met een factor van 100 tot 10.000 verkrijgen.

2.4 Het elektron, de basis van de elektronica

3/2.5

Lading, veld, capaciteit en potentiaal

Inleiding

Van historie naar wetenschap

In de voorgaande hoofdstukken is reeds het een en ander geschreven over de begrippen die in dit hoofdstuk aan de orde komen. Toen werden deze begrippen echter voornamelijk in een historisch kader geplaatst, terwijl in dit hoofdstuk een meer wetenschappelijke benadering wordt gekozen. Dat is best moeilijk, want begrippen zoals veld en capaciteit zijn in feite alleen exact te definiëren met behulp van vrij ingewikkelde wiskunde. Nu is het niet de bedoeling dat men eerst een cursus wiskunde moet volgen alvorens dit hoofdstuk begrepen wordt! Vandaar dat zoveel mogelijk gebruik zal worden gemaakt van fysische beschrijvingen, waarvan gehoopt wordt dat de lezer(es) er zich iets bij kan voorstellen.

Basisbegrippen

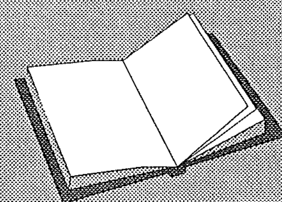
De in dit hoofdstuk behandelde begrippen kan men zonder meer de fundamenten van de elektriciteit en de elektronica noemen. Meer nog, zonder deze begrippen zou het heelal, zoals de mens dat waarneemt, niet eens bestaan! Bestond er bijvoorbeeld geen elektrische lading met de typische eigenschappen die dit verschijnsel heeft, dan zouden elektronen niet in een baan rond een atoomkern blijven cirkelen en zou er dus geen sprake van zijn dat zich, in de loop der voorbije miljarden jaren, allerlei chemische elementen en verbindingen hebben kunnen vormen. Het heelal zou dan nog steeds bestaan uit de "kosmische oersoep", waarvan men veronderstelt dat alles er ooit mee begonnen is. Zou er geen elektrisch veld bestaan, dan zou zoiets als "elektromagnetische straling" en dus licht nooit hebben kunnen ontstaan. Kortom, in dit hoofdstuk worden begrippen behandeld die fundamenteel zijn voor de gehele natuurkunde en voor ons eigen bestaan.

Elektrische lading

Wat is lading?

Een zeer fundamentele vraag, waarop helaas geen antwoord mogelijk is! Wat lading is, weet men ook nu nog steeds niet.

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/2.2
Hoofdstuk 3/2.3
Hoofdstuk 3/2.4



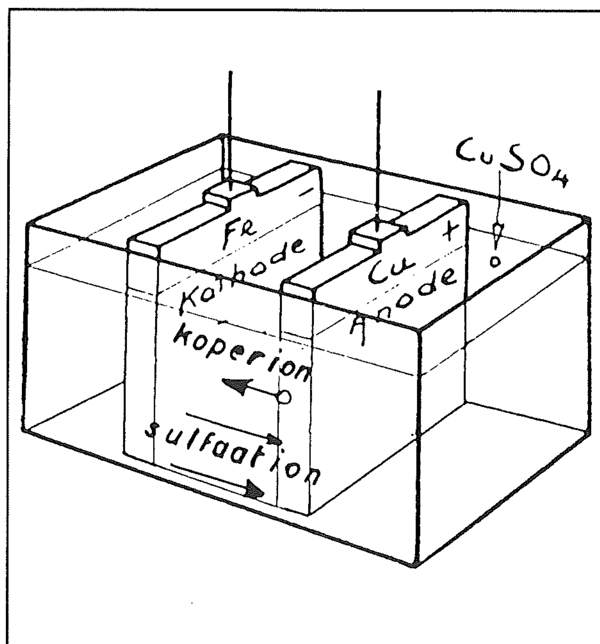
Men stelt vast dat het een fundamentele eigenschap van de natuur is en dat sommige bouwstenen van de materie, zoals elektronen en protonen die eigenschap bezitten. Andere fundamentele bouwstenen, zoals neutronen, hebben die eigenschap niet. Net zo min kan men verklaren waarom er twee soorten ladingen bestaan. Tot nu toe kan het enige antwoord op deze vraag luiden ***"omdat anders het heelal niet het heelal zou zijn en er geen mensen zouden zijn om de schoonheid van dat heelal waar te nemen"***. Wie dit een beetje flauw vindt zal verbaasd zijn door het feit dat deze redenering is uitgegroeid tot een basisprincipe van sommige moderne wetenschappers, het zogenoemde "antropisch principe". Alle fundamentele eigenschappen van de materie die niet verklaard kunnen worden, worden aan deze kapstok opgehangen! Gelukkig zijn er ook serieuze wetenschappers, die het antropisch principe als onwetenschappelijk terzijde schuiven en echt op zoek zijn naar het antwoord op dergelijke fundamentele vragen.
Hoe dan ook, elektrische lading bestaat en het was de Amerikaan Benjamin Franklin die in het jaar 1747 het begrip "elektrische lading" en de deelbegrippen "positief" en "negatief" invoerde. Tegengestelde elektrische ladingen trekken elkaar aan, gelijke ladingen stoten elkaar af.

Symbool en eenheid van lading

Het symbool van elektrische lading, de afkorting die in wiskundige formules wordt gebruikt voor het aanduiden van deze lading, is Q. De eenheid van lading is de Coulomb, afgekort tot C. Deze naam werd gekozen ter ere van de wetenschapper Charles Coulomb, die in het jaar 1788 zijn "Wet van Coulomb" opstelde, waarmee de aantrekkingskracht die twee ladingen op elkaar uitoefenen wiskundig werd beschreven.
De Coulomb is geen fundamentele grootheid en kan in het MKS-stelsel ook worden uitgedrukt als As, Ampère maal seconde. De relatie is eenvoudig:
1 C = 1 As.

De definitie van de Coulomb

Uiteraard moet exact worden gedefinieerd hoe groot 1 C is, of met andere woorden, met hoeveel lading de eenheid overeen komt. Deze definitie werd lang geleden vastgesteld en wel met behulp van de elektrochemie. Er zijn in de loop der tijden twee verschillende definities van de eenheid Coulomb in zwang gekomen.



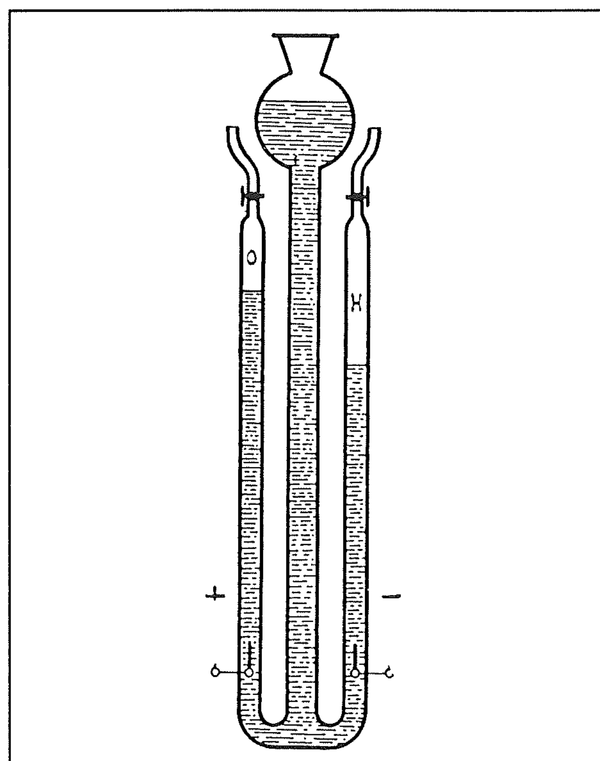
Figuur 3/2.5-1: Het eerste elektrochemisch experiment, waarmee de grootte van de Coulomb wordt gedefinieerd.

– Koperneerslag
  Stel, zoals voorgesteld in figuur 3/2.5-1, een glazen bak waarin kopersulfaat $CuSO_4$ in water wordt opgelost. In de

2.5 Lading, veld, capaciteit en potentiaal

vloeistof zijn twee metalen platen gehangen, een van koper (Cu) en een van ijzer (Fe). Als men nu beide platen verbindt met een spanningsbron zal er door de geleidende vloeistof een elektrische stroom gaan vloeien. Deze stroom bestaat uiteraard uit vrije elektronen die een bepaalde negatieve lading vertegenwoordigen. Die vrije elektronen, die zich door de vloeistof spoeden, zullen bepaalde interacties aangaan met de kopersulfaat atomen in de vloeistof. Dit is een ingewikkeld proces, dat in hoofdstuk 3/2.13 beschreven wordt. Het gevolg hiervan is dat zich op de ijzeren plaat een dun laagje koper afzet. De hoeveelheid koper die op het ijzer terecht komt wordt gebruikt voor het definiëren van de eenheid Coulomb. Eén Coulomb is de hoeveelheid lading die in een kopersulfaat oplossing 0,328 mg koper afscheidt.

- Waterstof vrijgave
  Dit experiment wordt beschreven aan de hand van figuur 3/2.5-2. In een zogenoemde Voltameter, een glazen apparaat bestaande uit drie holle buizen dat met aangezuurd water wordt gevuld, zitten in de twee buitenste buizen elektroden. De twee kraantjes, aan de bovenzijde van de buitenste buizen, kunnen worden geopend zodat deze buizen zich volledig met water vullen. Nadien worden de kraantjes gesloten. Als men nu tussen de elektroden een gelijkspanning legt zal men vaststellen dat er een stroom door het water gaat vloeien. Die stroom bestaat natuurlijk weer uit vrije elektronen, die elektrochemische reacties aangaan met de watermoleculen H_2O. In de buis die met de positieve pool van de batterij is verbonden, stelt men vast dat er zuurstofgas belletjes rond de elektrode ontstaan. In de tweede buis, verbonden met de negatieve pool, ontstaan waterstofgas belletjes rond de elektrode. Als de gasbelletjes groot genoeg zijn stijgen zij op en verdringen het water. Na enige tijd stelt men vast dat er heel precies twee keer meer waterstofgas H wordt gevormd dan zuurstofgas O. Aan de hand van deze waarnemingen heeft men de grootte van één Coulomb bepaald als de hoeveelheid lading, die noodzakelijk is om 0,0104 mg waterstofgas te laten ontstaan. Omdat men het volume van de buis weet en het soortgelijk gewicht van waterstof kan men het gewicht bepalen aan de hand van de lengte van de waterstofgas kolom H in de buis.



Figuur 3/2.5-2: De tweede elektrochemische manier om de eenheid van lading te definiëren.

1 C veel te groot

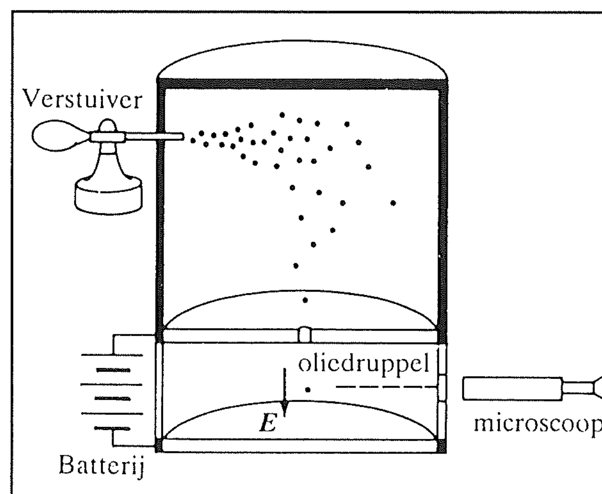
Nu is 1 C een immense hoeveelheid lading. Als bijvoorbeeld twee puntladingen die respectievelijk +1 C en -1 C groot zijn op een onderlinge afstand van één meter zouden worden geplaatst, dan zouden deze twee ladingen elkaar aantrekken met een kracht van ongeveer één miljoen ton. In de praktijk zal dus steeds gewerkt worden met mC en zelfs μC.

De fundamentele lading

Volgens de klassieke mechanica zijn het elektron en het proton de fundamentele bouwstenen van de materie, dat wil zeggen dat zij niet verder gedeeld kunnen worden. De quantummechanica heeft geleerd dat dit absoluut niet het geval is, maar voor het beschrijven van fundamentele elektrische en chemische verschijnselen doet dat niets ter zake. Nu hebben elektronen en protonen lading en het ligt dus voor de hand om in de klassieke mechanica aan te nemen dat de lading van een elektron en een proton de meest fundamentele lading is die bestaat. De vraag is dan natuurlijk hoe groot deze lading is. De wetenschapper Millikan slaagde er in deze lading te meten en stelde vast dat de fundamentele lading gelijk is aan $1{,}60218.10^{-19}$ C. Dit wil dus zeggen dat er ergens een lading van 1 C aanwezig is als er op die plaats niet minder dan 6.290.000.000.000.000.000 elektronen te veel of te weinig zijn! De fundamentele lading van een elektron wordt voorgesteld door het symbool -e.

De proef van Millikan

In hoofdstuk 3/2.4 werd gesteld dat de proef, waarmee Millikan de lading van het elektron bepaalde, een experiment was dat als klassiek voorbeeld van goede experimentele natuurkunde in de geschiedschrijving geboekstaafd is. De meeste onderzoekers zouden immers onmiddellijk veronderstellen dat het onmogelijk is om zoiets kleins als de fundamentele lading van een elektron te meten en niet eens gaan nadenken over een methode om deze grootheid te meten. Millikan deed dat wél en bedacht een systeem waarmee het, via allerlei omwegen, toch mogelijk bleek het onmeetbare te meten. Aan de hand van figuur 3/2.5-3 wordt in het kort uitgelegd hoe Millikan te werk ging.

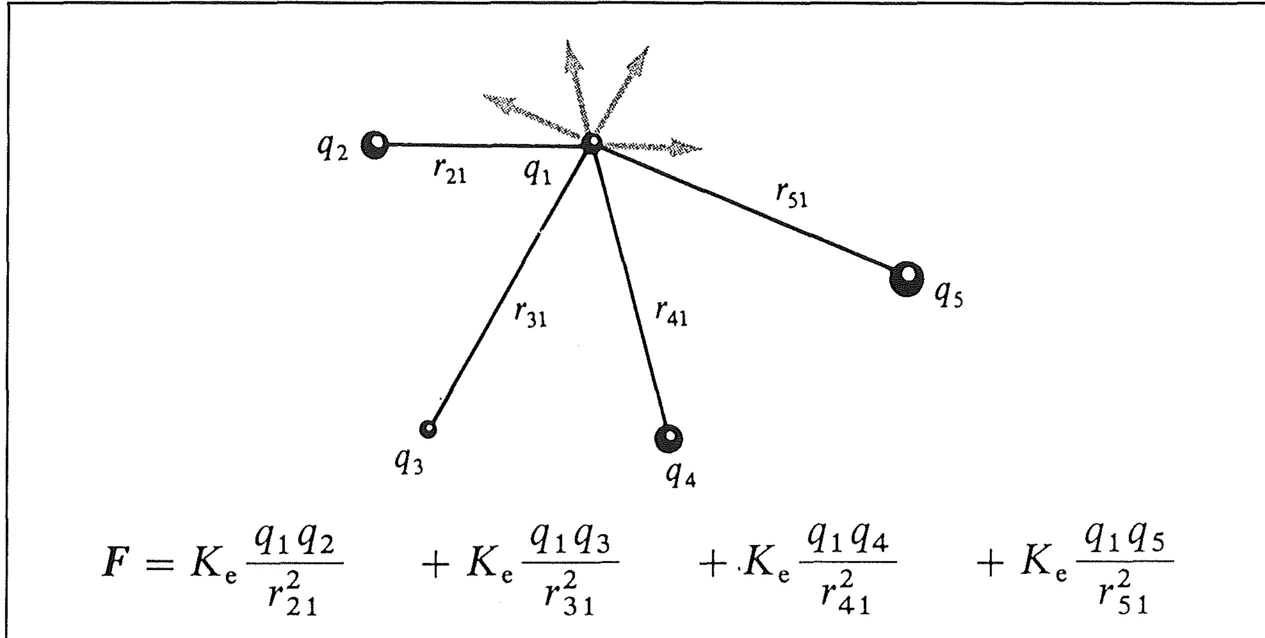


Figuur 3/2.5-3: De basisopzet van de proef van Millikan.

In een vat wordt via een verstuiver olie verstoven tot fijne druppeltjes. Deze druppeltjes vallen uiteraard door hun gewicht naar beneden. Sommige druppeltjes kunnen via een klein gaatje tot het onderste compartiment van het vat doordringen. Dat is opgebouwd uit twee metalen platen, die verbonden worden met een regelbare gelijkspanning van een batterij. De oliedruppeltjes die tussen de platen komen zullen nog steeds, als gevolg van hun gewicht en de aantrekkingskracht van de aarde, naar de onderste plaat willen vallen. De ruimte tussen de platen wordt bestraald met een sterke bundel röntgen-

straling. Deze stralen zullen de luchtatomen tussen de platen in stukken scheuren, waardoor vrije elektronen en positieve ionen ontstaan. De vrije elektronen kunnen zich nu binden aan de oliedruppeltjes. Als een oliedruppeltje een vrij elektron bindt, dan krijgt het een negatieve lading, die uiteraard gelijk is aan de lading van het elektron. Het gevolg is dat het negatief geladen druppeltje wordt aangetrokken door de positieve bovenste plaat.
Er werken nu twee tegengestelde krachten in op het geladen druppeltje. Op de eerste plaats de aantrekkingskracht van de aarde, op de tweede plaats de Coulombkracht. De spanning tussen de twee platen kan nu zo geregeld worden dat beide krachten even groot zijn en dat de geladen oliedruppeltjes blijven zweven tussen de platen. Dit kan zijdelings met een microscoop worden waargenomen. Met deze microscoop kan ook de diameter van de druppeltjes gemeten worden. Hieruit kan men het volume berekenen en omdat het soortgelijk gewicht van de olie bekend is, kan men dus het gewicht van een druppeltje bepalen. Uit dit gewicht kan men weer de grootte van de aantrekkingskracht berekenen, die op de druppel wordt uitgeoefend door de aarde. De formule hiervoor werd door Newton bepaald. Deze kracht is gelijk aan de kracht die door het elektrisch veld tussen de platen wordt uitgeoefend op de geladen druppel. Uit de wet van Coulomb kan men hieruit afleiden hoe groot de lading van de druppel is. Uiteraard heeft Millikan (en zijn assistenten) dit niet voor één druppeltje gemeten en berekend, maar voor duizenden. Aan de hand van statistische berekeningen kan men dan een gemiddelde waarde berekenen voor de lading van het elektron. Millikan heeft voor dit zeer ingenieus bedachte experiment in 1923 de Nobelprijs voor natuurkunde gekregen.

De eerste wet van Coulomb
Aan de hand van de in figuur 3/2.3-9 reeds beschreven torsie-balans was Charles Coulomb in staat een formule op te stellen die de kracht gaf die twee elektrische puntladingen op elkaar uitoefenen. De kracht is recht evenredig met het product van de ladingen en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tussen de ladingen.
Let wel dat het begrip puntlading hierbij van fundamenteel belang is. De wet van Coulomb geldt inderdaad alleen als de twee geladen voorwerpen minimale afmetingen hebben en als deze zich in een ruimte bevinden die volmaakt vacuüm (luchtledig) gezogen is.
De eerste wet van Coulomb wordt wiskundig in zijn meest algemene vorm gegeven door de uitdrukking die in figuur 3/2.5-4 is samengevat.
Puntlading q_1 is positief en is omgeven door vier positieve puntladingen q_2 tot en met q_5. Tussen q_1 en de vier overige ladingen treden nu vier afstotende krachten op, die elkaar niet beïnvloeden, zodat de uitgeoefende krachten simpelweg vectorieel bij elkaar opgeteld kunnen worden om de totale kracht te berekenen. Elk ladingspaar gedraagt zich alsof de andere ladingen niet aanwezig zijn. Dit komt tot uiting in de wiskundige uitdrukking, die in dezelfde figuur is voorgesteld. Uit deze figuur blijkt duidelijk dat de krachten inwerken in de richting van de verbindingsas tussen de puntladingen.
De kracht F, opgewekt als gevolg van de aantrekking of afstoting van elektrische puntladingen, wordt de Coulomb-kracht genoemd.



$$F = K_e \frac{q_1 q_2}{r_{21}^2} + K_e \frac{q_1 q_3}{r_{31}^2} + K_e \frac{q_1 q_4}{r_{41}^2} + K_e \frac{q_1 q_5}{r_{51}^2}$$

Figuur 3/2.5-4: De meest algemene wiskundige uitdrukking van de eerste wet van Coulomb.

De elektrische constante K_e

In de formule van Coulomb moest een bepaalde constante factor K_e opgenomen worden om de formule in overeenstemming te brengen met de experimenteel gemeten krachten. Deze constante noemt men de elektrische constante en heeft een waarde die gelijk is aan:

$\mathbf{K_e = 8{,}98742.10^9\ N\ m^2/C^2}$

Deze fundamentele natuurconstante wordt ook wel eens de constante van Coulomb genoemd.

Wie zich afvraagt waar die absurde eenheid van N m^2/C^2 vandaan komt, hoeft niet lang naar een antwoord te zoeken. In een wiskundige formule moet er, links en rechts van het gelijkheidsteken, steeds dezelfde eenheid gevonden worden. Anders vergelijkt men immers appels met peren, want een wiskundige uitdrukking als 5 meter = 10 seconde is natuurlijk onzinnig. Links staat de eenheid van kracht, de Newton N ofwel kgm/s^2. Dus moet ook rechts dezelfde eenheid worden aangetroffen. Het zal duidelijk zijn dat dit alleen het geval is als men aan de constante van Coulomb de eenheid N m^2/C^2 toekent. De factoren m^2 en $1/C^2$ zijn immers aanwezig in teller en noemer van de formule en kunnen dus geschrapt worden. Het enige dat overblijft is N. Misschien allemaal een beetje vreemd, maar wiskunde werkt nu eenmaal zo!

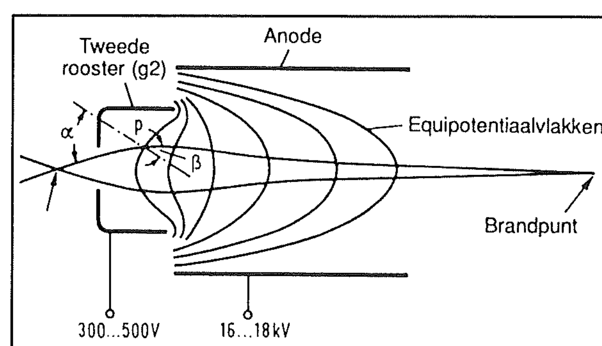
Het belang van de Coulomb-kracht in de natuurkunde

De wet van Coulomb beschrijft een van de meest fundamentele krachten die in de natuur bestaan. Op zeer grote schaal bepaalt de zwaartekracht de samenstelling van het heelal. Op zeer kleine schaal zijn het de zwakke en sterke kernkrachten die het gedrag van fundamentele atoomdeeltjes vast leggen. Alles dat daartussen zit wordt bestuurd door de Coulomb-kracht. Daarnaast heeft deze kracht tal van praktische toepassingen. Elektronen worden in de beeldbuis van een oscilloscoop afgebogen, doordat er Coulomb-krachten op inwerken. De elektronenspot die het

scherm van een beeldbuis raakt is niet groter dan een punt, doordat de elektronenstraal door middel van Coulomb-lenzen op het scherm gefocusseerd wordt. Elektronen worden in deeltjesversnellers tot grote snelheden versneld doordat zij onderworpen worden aan diverse Coulomb-krachten. Coulomb-krachten zorgen ervoor dat stofdeeltjes uit de rookgassen van een oven worden verwijderd. In verfspuiterijen wordt er heel wat verf bespaard doordat de vernevelde verfdeeltjes elektrisch worden opgeladen en nadien massaal terecht komen op het te bespuiten voorwerp.

Een praktische toepassing

Als praktische toepassing van de Coulomb-kracht wordt de elektrostatische lens besproken. Deze wordt gebruikt om een straal elektronen te bundelen. In figuur 3/2.5-5 is het principe van een dergelijke lens getekend, zoals deze wordt aangetroffen in de beeldbuis van een TV. De elektronenstraal wordt gegenereerd door een kathode-materiaal op te warmen dat gemakkelijk elektronen uitzendt. De uitgezonden elektronen worden aangetrokken door de anode (het scherm van de beeldbuis), die op een grote positieve spanning staat. Er is daar dus veel lading aanwezig. Zonder speciale maatregelen zouden de elektronen in de elektronenstraal echter zeer snel uit elkaar waaieren. De elektronen zijn immers allemaal negatief geladen en stoten elkaar af. Er zou geen sprake zijn van een scherpe lichtspot op het scherm. Tussen de kathode en de anode wordt een elektrostatische of Coulomb-lens geplaatst. Deze bestaat uit een rooster g2, dat op een positieve spanning van enige honderden Volt wordt aangesloten. Tussen dit rooster en de anode ontstaat een ladingsverschil, met als gevolg dat er in de ruimte een elektrostatisch veld van een speciale vorm ontstaat (zie later). De elektronen worden door dit veld afgebogen, natuurlijk door de Coulomb-krachten, en wel zo dat het brandpunt van de elektronenstraal precies op het scherm van de beeldbuis ligt. Op deze manier kan men elektronenbundels dus net zo focusseren als lichtstralen met optische lenzen.

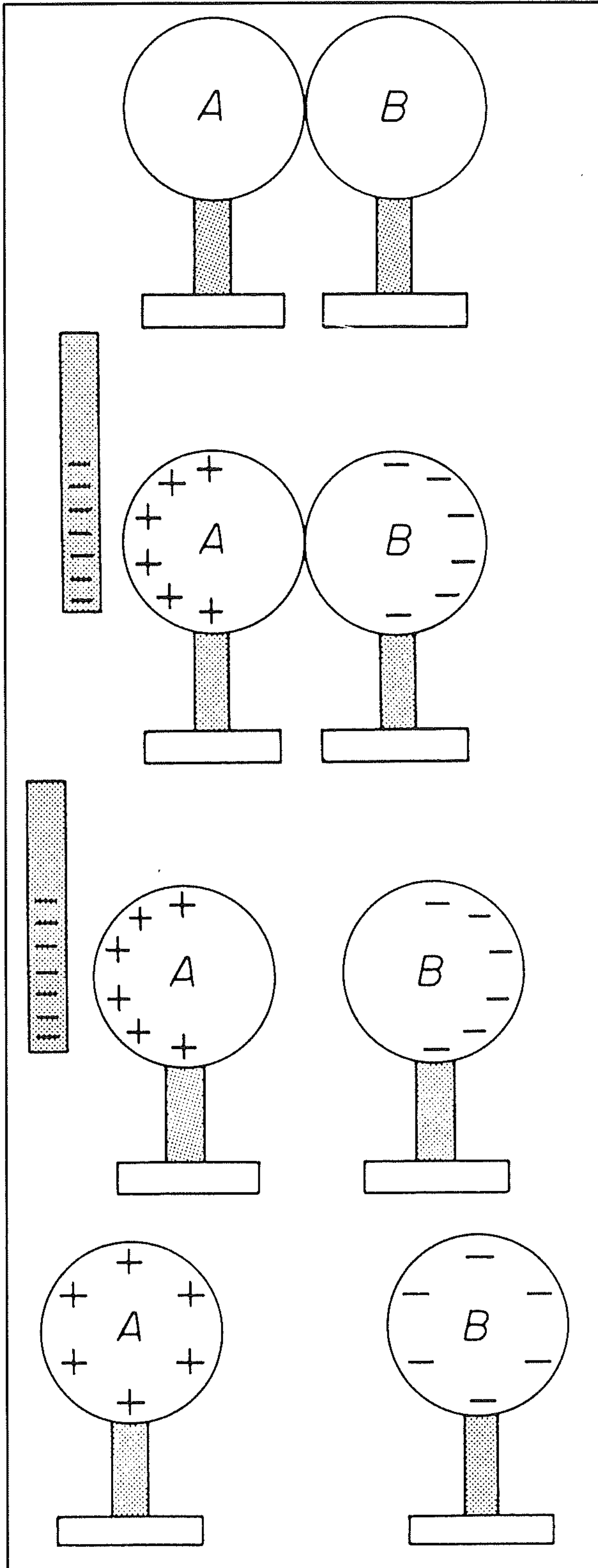


Figuur 3/2.5-5: Een toepassing van de Coulomb-kracht vindt men in de elektrostatische lens, waarmee een bundel elektronen op een scherm wordt gefocusseerd.

Ladingsinductie

Elektrische ladingen hebben een aantal vreemdsoortige eigenschappen, waarvan er in de volgende paragrafen enige worden besproken. Het eerste verschijnsel is “inductie”. Ladingen kunnen van het ene naar het andere voorwerp worden overgebracht, zonder dat er sprake is van een rechtstreeks geleidende verbinding tussen de voorwerpen. Dergelijke verschijnselen zijn niet alleen theoretisch van belang, maar spelen bijvoorbeeld een grote rol bij het begrijpen van de werking van een FET. Ook daar is sprake van ladingsinductie in de sperlaag tussen de gate en de rest van de halfgeleider. Het principe van ladingsinductie wordt toegelicht aan de hand van figuur 3/2.5-6.

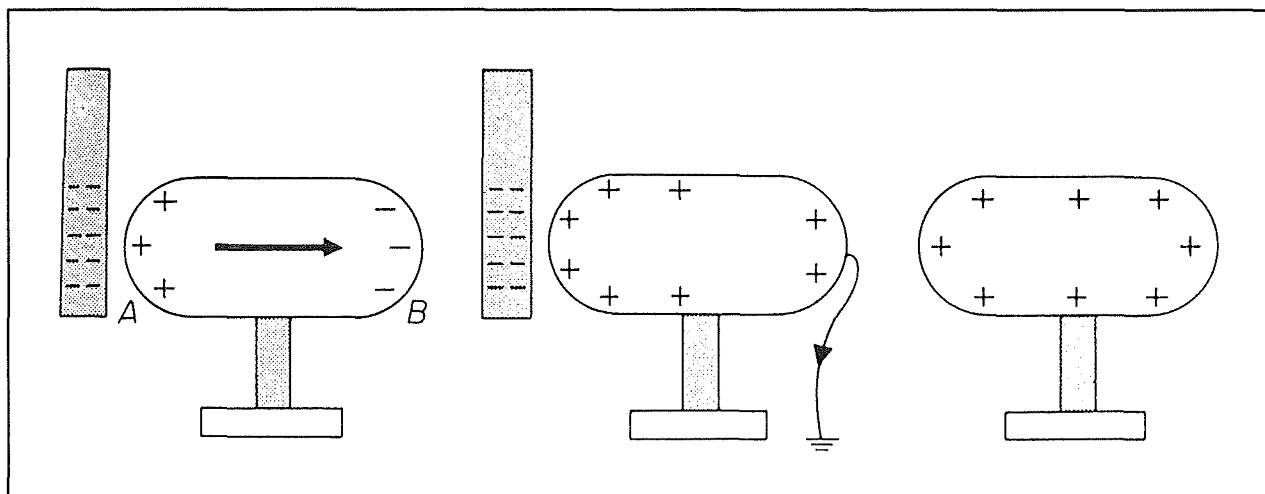
2.5 Lading, veld, capaciteit en potentiaal



Figuur 3/2.5-6: Het algemene principe van ladingsinductie.

Twee koperen bollen A en B worden gemonteerd op isolatoren en met elkaar in contact gebracht. Zij vormen dan één geleidend voorwerp in rust en er is geen sprake van een ladingsverdeling. Nu brengt men een negatief geladen staaf, bijvoorbeeld eboniet dat flink gewreven werd met een doek, in de buurt van bol A. De vrije elektronen in het koper van bol A zullen door deze negatieve lading worden afgestoten en “vluchten” naar bol B. In bol A blijven koperatomen over met een tekort aan elektronen. Deze onvolledige atomen noemt men ionen en het zal duidelijk zijn dat deze positief geladen zijn. Het gevolg hiervan is dat het ladingsevenwicht wordt verbroken en dat de linker rand van bol A positief oplaadt en de rechter rand van bol B negatief. Vervolgens verplaatst men bol B een beetje naar rechts, zodat het elektrisch contact tussen beide bollen verbroken wordt. Men stelt vast dat de ladingsverdeling in beide bollen niet verandert. Trekt men tot slot de ebonieten staaf weg, dan kan men met behulp van een zeer gevoelige ladingsmeter vaststellen dat bol A een positieve lading heeft en bol B een negatieve lading. De ladingen zijn keurig over het oppervlak van de bollen verdeeld. Dit vreemde verschijnsel kan gemakkelijk verklaard worden uit het atoommodel van Rutherford. Een geleider zoals koper heeft veel zeer los gebonden elektronen op de buitenste schil. Deze worden door de sterke negatieve lading van de staaf uit de koperatomen bevrijd. De nu vrije elektronen kunnen gemakkelijk door het koper van atoom naar atoom springen en migreren door de afstotende kracht van de staaf zo ver mogelijk uit de buurt, dus naar de rechter zijde van bol B. In bol A blijft een aantal atomen achter, dat elektronen mist.

2.5 Lading, veld, capaciteit en potentiaal



Figuur 3/2.5-7: Het principe van ladingsaccumulatie.

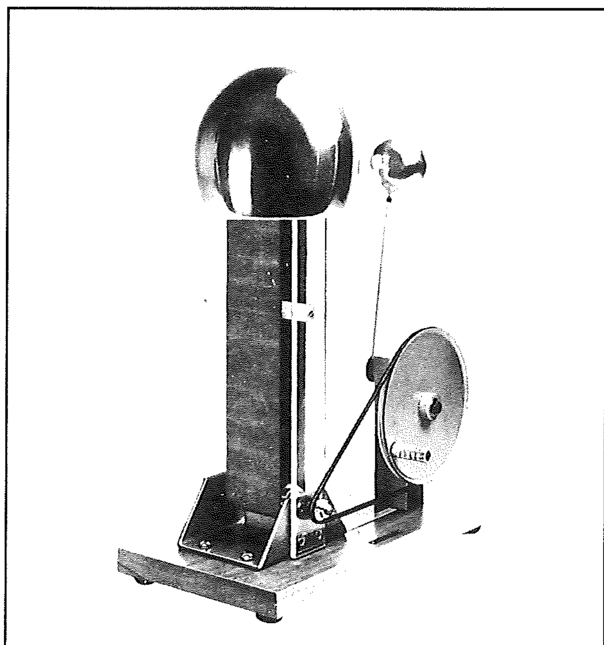
Deze atomen worden dan positieve ionen en deze worden door de negatieve lading van de staaf aangetrokken. Op het moment dat het contact tussen beide bollen verbroken wordt kunnen de vrije elektronen nooit meer terug keren naar hun atomen. Vandaar dat bol B achter blijft met een teveel aan vrije elektronen en bol A met een teveel aan positieve ionen.

Ladingsaccumulatie

Een ander verschijnsel dat in dit kader belangrijk is, is de zogenoemde "ladingsaccumulatie". Dit verschijnsel is een rechtstreeks gevolg van de ladingsinductie en kan worden gebruikt om een voorwerp heel sterk positief of negatief op te laden. Het principe is getekend in figuur 3/2.5-7.

Stel dat het de bedoeling is een metalen cilinder positief te laden. Men moet dan in eerste instantie een negatief geladen voorwerp, zoals een staaf, in de buurt van de cilinder houden. Door ladingsinductie zal de linker helft A van de cilinder positief geladen worden en de rechter helft B negatief. Die negatieve lading kan nu afgevoerd worden door de rechter helft van de cilinder even door middel van een draadje te verbinden met de aarde. De vrije elektronen vloeien dan af naar de aarde, die elektrisch neutraal is. Nadat de verbinding is verbroken en de staaf verwijderd, zal de positieve lading zich over de cilinder verspreiden. Nadien kan het proces herhaald worden, waardoor weer vrije elektronen worden afgevoerd naar de massa en er dus nog meer positieve ionen in de cilinder achter blijven. Op deze manier kan de positieve lading in de cilinder stap na stap opgevoerd worden. Het principe van ladingsaccumulatie wordt gebruikt in de zogenoemde "elektriseermachines", zoals de Van de Graaf generator. De ladingen die met dergelijke apparaten verzameld kunnen worden zijn zo groot dat men in staat is decimeter lange vonken te trekken. Het principe van de Van de Graaf generator werd reeds verklaard aan de hand van figuur 3/2.3-7. In figuur 3/2.5-8 wordt een indruk gegeven van de praktische uitvoering van een dergelijk apparaat. Dit is een klein model, dat met de hand moet worden aangedreven en bedoeld is voor de natuurkunde practica in het voortgezet onderwijs.

2.5 Lading, veld, capaciteit en potentiaal

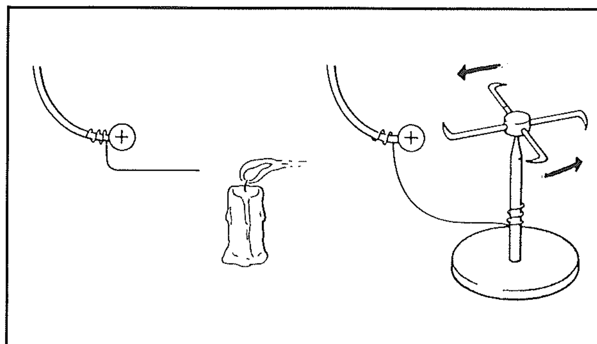


Figuur 3/2.5-8: Een kleine uitvoering van een Van de Graaf generator.

Elektrische winden

Grote ladingen zijn in staat vreemdsoortige verschijnselen te veroorzaken. Een van de meest intrigerende is de elektrische wind. Stel dat men, zoals links getekend in figuur 3/2.5-9, een elektrische geleider verbindt met het sterk positief geladen oppervlak van een Van de Graaf generator. De geleider is voorzien van een scherpe punt. Als men nu deze punt in de buurt van een kaarsvlam houdt zal men vaststellen dat de vlam van de kaars opzij wordt geblazen. Het is zelfs mogelijk dat de vlam wordt uitgeblazen! Blijkbaar wekt de sterk positief geladen naaldpunt een flinke luchtverplaatsing op.

Een ander experiment waarmee men elektrische wind kan aantonen is de zogenoemde *"molen van Hamilton"*. Deze opstelling is rechts in figuur 3/2.5-9 getekend. Een rad, bestaande uit enige gepunte spaken waarvan de uiteinden onder een hoek van 90 graden gebogen zijn, kan vrij draaien op een asje.

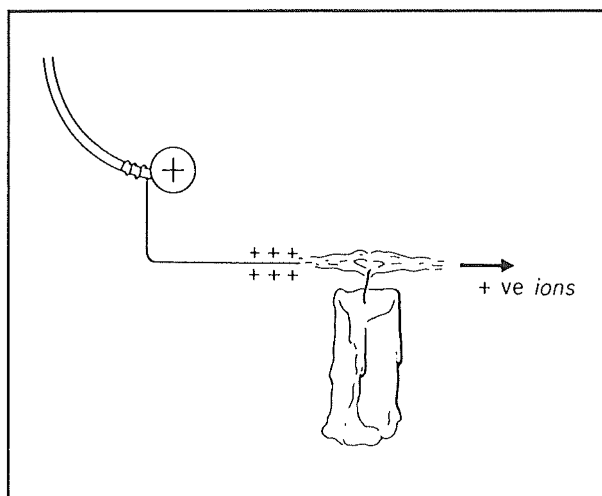


Figuur 3/2.5-9: Twee experimenten waarmee men het waaien van de "elektrische wind" kan aantonen.

Zowel de as als het rad moeten van een elektrisch geleidend materiaal zijn gemaakt. Als men nu de as verbindt met de uitgang van een positief geladen Van de Graaf generator, zal men opmerken dat het rad gaat draaien. Blijkbaar veroorzaken de gepunte uiteinden van de spaken een luchtverplaatsing, waardoor het rad in de tegengestelde richting gaat draaien. Dit vreemde verschijnsel kan verklaard worden aan de hand van figuur 3/2.5-10. Lucht bevat natuurlijk atomen en hoewel deze atomen isolatoren zijn en dus weinig tot geen vrije elektronen hebben, kunnen sommige elektronen van de buitenste banen toch door de grote aantrekkingskracht van de puntige sterke positieve lading uit het atoom worden gerukt. Er ontstaan dus, in de buurt van de punt, negatief geladen vrije elektronen en positief geladen ionen. De negatieve elektronen worden door de sterk positief geladen punt aangetrokken, de positieve ionen worden er door afgestoten. Nu zijn elektronen heel wat lichter en kleiner dan ionen. De snel bewegende positieve ionen botsen tegen luchtatomen en slepen deze mee in hun bewegingsrichting. De lichte elektronen zullen ook wel tegen atomen botsen, maar deze zijn niet in staat deze veel zwaardere objecten in beweging te

2.5 Lading, veld, capaciteit en potentiaal

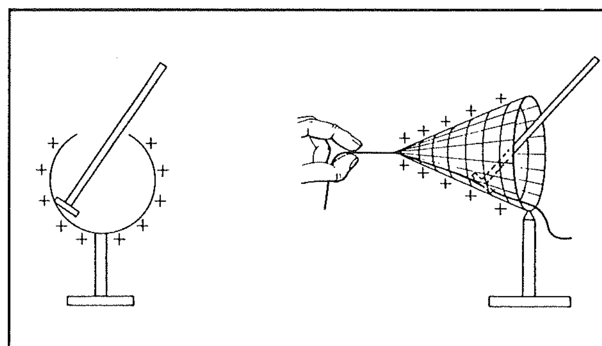
zetten. Het gevolg is dus dat er een luchtverplaatsing ontstaat vanuit de ladingspunt, een beweging die verantwoordelijk is voor het uitblazen van de kaarsvlam en voor het in beweging zetten van het rad.



Figuur 3/2.5-10: De verklaring van de elektrische wind: luchtatomen worden onder invloed van de sterke lading ontleed in lichte negatieve vrije elektronen en zware positieve ionen.

Het ladingsgedrag van holle geleiders

Een volgende vreemdsoortige eigenschap van ladingen is dat zij zich bij voorkeur ophouden in de buitenste oppervlakteschil van geleiders. Voor de ladingen hoeven de apparaten van figuur 3/2.5-6 dus niet gemaakt te zijn van massieve bollen! Een zeepbeldunne koperen bol voldoet net zo goed. Ook dit vreemde verschijnsel kan gemakkelijk experimenteel aangetoond worden. In de linker tekening van figuur 3/2.5-11 is een holle koperen bol aangebracht op een isolerende ophanging. In de bovenzijde van de bol is een klein gaatje aangebracht, zodat men met een ladingsmeter naar binnen kan. De holle bol wordt nu opgeladen door middel van ladingsinductie. Als men nadien met de ladingsmeter de bol zowel van binnen als van buiten aftast zal men vaststellen dat alle lading (positief in dit geval) terug te vinden is aan de buitenzijde en men in de binnenkant van de bol absoluut geen lading meet.



Figuur 3/2.5-11: Twee experimenten, waarmee men de ladingsverdeling op en in een holle geleider kan meten.

In de rechter tekening is een zeer beroemd experiment getekend, het ***"vlindernet-experiment van Faraday"***. Faraday gebruikte een vlindernetje van katoen, dat voorzien was van een dunne zijden draad. Het net was aan de punt vast verbonden met de zijden draad en aan de andere kant opgehangen aan een isolerende voetplaat. Het net werd door middel van inductie opgeladen. Als men nadien met een ladingsmeter binnen- en buitenzijde van het net aftast, stelt men vast dat alle lading alleen aan de buitenzijde van het net is terug te vinden. Nadien wordt het net binnenste buiten gekeerd door aan de zijden draad te trekken. Verbazingwekkend is dat de ladingsmeter een identieke ladingsverdeling vaststelt! Tijdens het binnenste buiten keren van het net heeft de positieve lading zich dus blijkbaar razendsnel verplaatst van de ene kant van het net naar de andere kant.
Deze vreemdsoortige eigenschap van geladen voorwerpen kon alleen worden ver-

klaard toen de wetenschap inzicht kreeg in het rechtstreeks gevolg van elektrische lading, namelijk het elektrisch veld.

Elektrisch veld

Inleiding

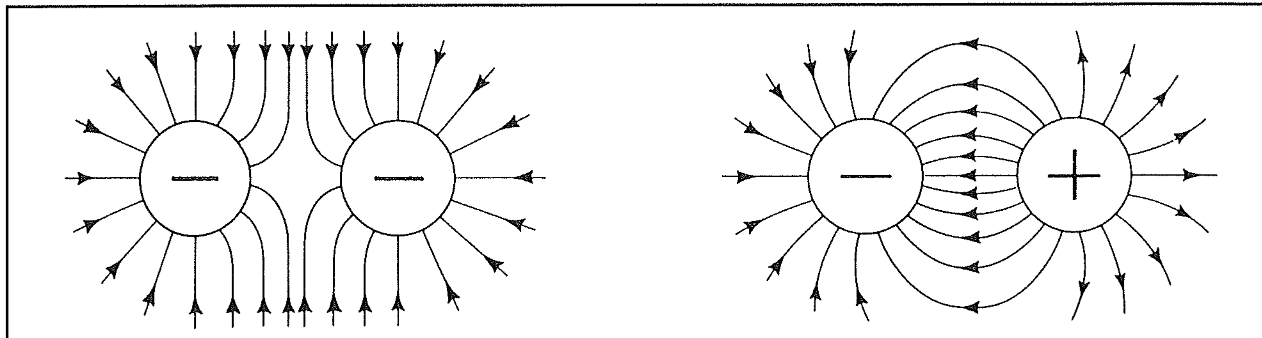
Rond een punt dat een elektrische lading heeft, ontstaat per definitie een elektrisch veld. Dit lijkt in tegenspraak met de in hoofdstuk 3/2.3 gestelde unificatie tussen elektrisch, magnetisch en gravitationeel veld. Magnetische velden zijn duidelijk alleen aanwezig tussen een zuid- en een noordpool (het ene bestaat niet zonder het andere) en ook gravitationele velden ontstaan alleen tussen massa's. Men zou dus verwachten dat een elektrisch veld alleen aanwezig is tussen twee verschillend geladen voorwerpen. In feite is dat ook zo. Dit wil echter niet zeggen dat die voorwerpen in elkaars nabijheid moeten liggen. Ook rond één geladen punt kan men een elektrisch veld vaststellen. De tweede lading kan namelijk zonder probleem "ergens in het oneindige liggen". Elektrische velden hebben namelijk de eigenschap dat zij zich zonder probleem tot in het oneindige kunnen uitstrekken. Ook nu kan de vraag wat zo'n elektrisch veld nu precies is, niet exact beantwoord worden. Een veld is een fundamentele eigenschap van de natuur waar wij, mensen met beperkt voorstellingsvermogen, ons niets bij kunnen voorstellen. In hoofdstuk 3/2.2 werd reeds gesteld dat een veld, of het nu een elektrisch veld, magnetisch veld of gravitatieveld is, nog het best kan opgevat worden als een deel van de ruimte waarin een bepaalde kracht zich kan manifesteren. Die kracht wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van lading, magnetische pool of massa. Vandaar dat men stelt dat een elektrisch veld de invloedsfeer in de ruimte is van een elektrische lading. Deze invloed uit zich onder de vorm van een kracht, die wordt uitgeoefend op een tweede elektrische lading die wordt geplaatst binnen de invloedsfeer (dus het veld) van de eerste lading.

De krachtlijnen van een veld

Een veld wordt voorgesteld door rond de lading een aantal denkbeeldige lijnen te tekenen. Het verloop van die lijnen, die men de krachtlijnen noemt, geeft aan in welke richting er op dat bepaalde punt een kracht zou worden uitgeoefend. Faraday komt de eer toe als eerste wetenschapper het idee van de krachtlijnen van een elektrische lading te hebben bedacht. Dank zijn deze imaginaire lijnen kunnen een heleboel eigenschappen van ladingen worden verklaard. Rond een eenzame puntlading verlopen de krachtlijnen volledig radiaal, zoals reeds getekend in figuur 3/2.2-9. Brengt men echter twee puntladingen in elkaars nabijheid, dan zal men vaststellen dat de krachtlijnen van beide velden op elkaar reageren door ofwel elkaar te versterken (ongelijkpolige ladingen) ofwel elkaar tegen te werken (gelijkpolige ladingen). Dit is getekend in figuur 3/2.5-12.

De manier van denken van Faraday was natuurlijk niet zo vreemd. Ten slotte is iedereen die een staafmagneetje, een stukje karton en een potje ijzervijlsel in zijn zak heeft zitten in staat de krachtlijnen van een magnetisch veld zichtbaar te maken. Hoewel het bestaan van elektrische krachtlijnen nooit experimenteel is aangetoond, lag het voor de hand te veronderstellen dat een elektrisch veld zich net zo zou presenteren in de ruimte als een magnetisch veld.

2.5 Lading, veld, capaciteit en potentiaal



Figuur 3/2.5-12: De interactie tussen de krachtlijnen van twee puntladingen die in elkaars elektrisch veld worden geplaatst.

Elektrische veldsterkte

In een elektrisch veld ondergaat een geladen lichaam een kracht F waarvan de grootte recht evenredig is met de grootte van de lading Q. Die evenredigheidsfactor tussen kracht en lading noemt men de elektrische veldsterkte E. In formulevorm kan men dus schrijven:

F = E . Q

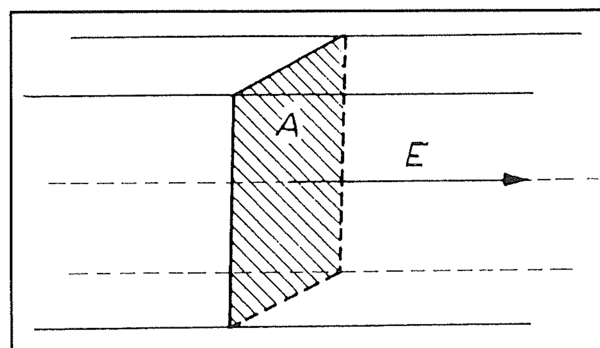
Omdat de kracht wordt uitgedrukt in N en de lading in C, moet de eenheid van elektrische veldsterkte gelijk zijn aan N/C, oftewel Newton per Coulomb. Denk er aan dat de elektrische veldsterkte een vectoriële grootheid is, die dus niet alleen een absolute grootte, maar ook een richting heeft.

Het belang van het begrip veldsterkte is dat men de door Faraday veronderstelde krachtlijnen nu wiskundig kan definiëren. Die krachtlijnen kunnen nu immers voorgesteld worden door een reeks veldsterkte-vectoren, waarvan de grootte de sterkte van de krachtlijnen definieert en de richting het verloop van de krachtlijnen.

Elektrische flux

Het woordje "flux" komt uit het Latijn en betekent stroom of stroming. Met behulp van dit begrip kan men de veldsterkte per oppervlakte definiëren. In figuur 3/2.5-13 is een homogeen elektrisch veld getekend, dat wil zeggen dat alle veldsterktevectoren E evenwijdig lopen en even groot zijn. In dit homogeen elektrisch veld is ***loodrecht*** een oppervlak A aangebracht. De elektrische flux Ψ, een Griekse letter die als "psi" wordt uitgesproken, wordt nu gedefinieerd als het product van het oppervlak A en de elektrische veldsterkte E die op die plaats aanwezig is:

Ψ = E . A



Figuur 3/2.5-13: De definitie van het begrip elektrische flux.

Dank zij het begrip flux is men in staat de ladingsverdeling in een homogeen, maar ook in een niet-homogeen elektrisch veld volledig wiskundig te beschrijven.

De wet van Gauss

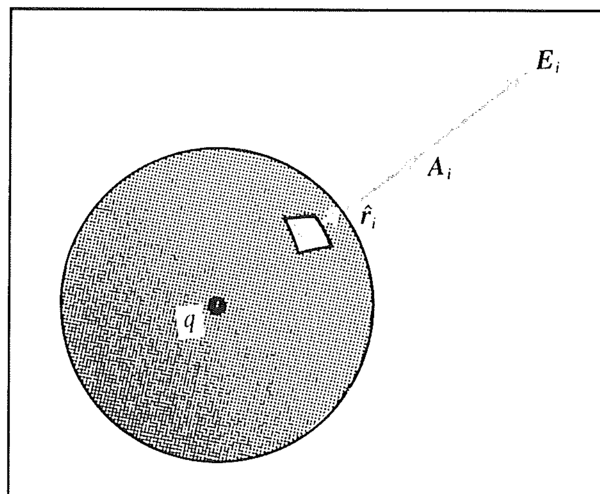
De wet van Gauss, in 1839 opgesteld door de Duitse fysicus Karl Friedrich Gauss (figuur 3/2.5-14), is de belangrijkste wet uit

de leer der elektrostatica. Deze leer houdt zich bezig met het beschrijven van de eigenschappen van statische elektrische velden, dus velden die bestaan rond punten met constante ladingen. De wet van Gauss geeft het wiskundig bewijs dat de flux, die door een gesloten oppervlak rond een puntlading ligt, constant is en volledig onafhankelijk van de vorm van het oppervlak. Het is in het kader van deze cursus absoluut onmogelijk om de bewijsvoering van deze stelling te beschrijven. Daarvoor is ingewikkelde wiskunde nodig, onder andere de theorie van de oppervlakte integralen. Ondanks dat, is het toch mogelijk op een eenvoudige manier de belangrijkheid van de wet van Gauss aan te tonen.



Figuur 3/2.5-14: Karl Friedrich Gauss, een Duitse fysicus die dank zij zijn "wet van Gauss" een eenvoudige manier bedacht om elektrische fluxen in een oppervlak te berekenen.

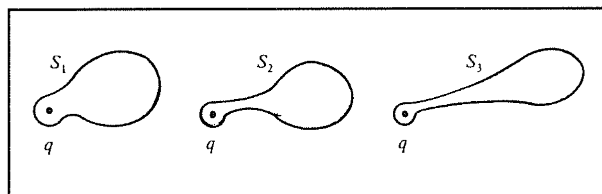
In figuur 3/2.5-15 is het eenvoudigst voorbeeld van een gesloten oppervlak rond een puntlading q getekend: een bol. Een wiskundige zal geen problemen hebben om de flux door het oppervlak van de bol te berekenen. Na vijf minuutjes rekenwerk zal hij er achter komen dat de flux recht evenredig is met de grootte van de lading q, maar onafhankelijk van de waarde van de straal r van de bol. Als men dus een grotere bol rond de puntlading voorstelt, dan zal dat geen invloed hebben op de waarde van de flux die door dit boloppervlak gaat!



Figuur 3/2.5-15: De elektrische flux die door het oppervlak van een bol rond een puntlading q gaat, is alleen afhankelijk van de grootte van de lading.

Het is nu de verdienste van Gauss dat hij wiskundig sluitend heeft aangetoond, dat deze stelling ook opgaat als de puntlading zich niet in het middelpunt van de bol bevindt. Bovendien kan men het boloppervlak vervangen door gelijk welk ander oppervlak. In figuur 3/2.5-16 zijn drie gesloten oppervlakken S_1, S_2 en S_3 voorgesteld, die een bepaalde lading q volledig omsluiten. Volgens de wet van Gauss zal

de elektrische flux die men in de oppervlakken zou kunnen meten, in alle drie de gevallen gelijk zijn en alleen afhankelijk van de grootte van de lading. Het zal duidelijk zijn dat deze wet heel belangrijk is, omdat men op deze manier het berekenen van elektrische fluxen door oppervlakken sterk kan vereenvoudigen.
De wet van Gauss kan wiskundig als volgt worden geformuleerd:
$\Psi = q_{inwendig} / \varepsilon_0$
Ook ε is een griekse letter, die als "epsilon" wordt uitgesproken. Deze constante factor geeft de verhouding tussen de flux en de lading.



Figuur 3/2.5-16: Uit de wet van Gauss volgt dat de elektrische fluxen door de oppervlakken S_1, S_2 en S_3 identiek zijn.

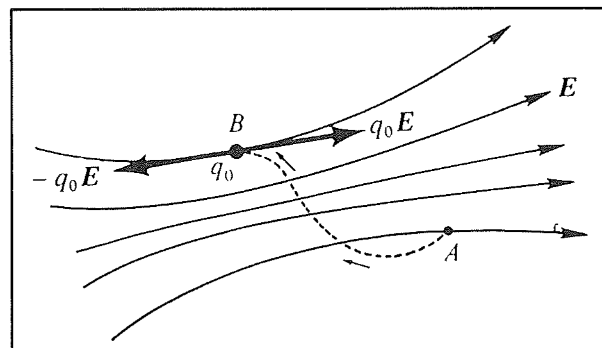
Het ladingsgedrag van holle geleiders verklaard

Dank zij de wet van Gauss kan men aantonen dat de lading steeds alleen aanwezig is aan de buitenzijde van holle geleiders (zie hoger). Geleiders worden gekenmerkt door de aanwezigheid van vrije elektronen en ionen, die reageren op krachten. Als een hol voorwerp, zoals getekend in figuur 3/2.5-11, opgeladen blijft, dan kan dit alleen betekenen dat er in het voorwerp geen krachten en dus geen veldsterkten aanwezig zijn. Zou dit namelijk wél het geval zijn, dan zouden die krachten inwerken op vrije elektronen of ionen en zou het elektrostatisch evenwicht onmiddellijk hersteld worden. Met andere woorden, het voorwerp zou ontladen. Maar als de veldsterkte E nul is, dan betekent dit dat ook de flux nul is. Uit de wet van Gauss volgt dan onmiddellijk dat ook de lading q binnen de geleider nul moet zijn.

Elektrisch potentiaal

Inleiding

Voor het begrijpen van het begrip elektrisch potentiaal moet men even terug grijpen naar de klassieke mechanica. Als men een kogel van de grond optilt en verplaatst naar een hoogte van één meter, dan moet men arbeid of energie verrichten. Die energie wordt als het ware opgeslagen in de kogel, want als men de kogel weer loslaat zal deze naar beneden vallen, waar uiteraard ook weer energie voor nodig is. De energie die in potentie in een kogel (of gelijk welk voorwerp) aanwezig is, noemt men potentiële energie. Het voorwerp is in staat energie te leveren, op het moment dat hiervoor de voorwaarden geschapen worden.



Figuur 3/2.5-17: Het begrip elektrisch potentiaal verklaard.

Elektrische potentiële energie

Vanwege de natuurkundige importantie van het begrip energie heeft men gezocht naar een mogelijkheid om dit begrip ook

2.5 Lading, veld, capaciteit en potentiaal

in de elektriciteitsleer in te voeren. De redenering die daarvoor ontwikkeld werd wordt verklaard aan de hand van figuur 3/2.5-17 en is als volgt.
Stel dat ergens in de ruimte een elektrisch veld aanwezig is, dat uiteraard gedefinieerd kan worden door de elektrische veldsterkte E. Stel nu dat in dit veld op punt B een elektrische lading q_0 wordt geplaatst. Deze lading zal een Coulomb-kracht ondervinden, die gegeven wordt door de uitdrukking:
$\mathbf{F = q_0 . E}$
Om de lading van punt B naar punt A te verplaatsen moet dus een tegengestelde kracht -F worden uitgeoefend op de lading. Volgens de algemene wetten van de mechanica (zie blz. 3/2.2-16) kan de arbeid die hiervoor nodig is uitgedrukt worden door:
$\mathbf{W = -F . s}$
Hierin is s een vectorfunctie die de afstand die wordt afgelegd door de lading beschrijft.
Als in de mechanica een hoeveelheid arbeid op een vallend lichaam wordt uitgeoefend, dus tegen de zwaartekracht in, stijgt de potentiële energie van het voorwerp met W. Iets dergelijks kan men zich ook voorstellen als op een lading q_0 een hoeveelheid arbeid wordt uitgeoefend, tegen de veldkracht in. Die toename van de potentiële energie van de lading wordt het elektrisch potentiaal van de lading genoemd.
Deze elektrische potentiële energie wordt voorgesteld door het symbool U en het energieverschil tussen de toestand in punt B en in punt A met ΔU. Ook Δ is alweer een Griekse letter, die als "delta" wordt uitgesproken. In de wis- en natuurkunde gebruikt men Δ steeds voor het uitdrukken van kleine verschillen in de waarde van een en dezelfde grootheid.

Men kan dit verschil in potentiële energie (in vereenvoudigde vorm zonder gebruik te maken van integraalrekening) uitdrukken door de formule:
$\mathbf{\Delta U = U_B - U_A = -q_0 . E . s}$

Het elektrisch potentiaalverschil
Nu is men niet zo geïnteresseerd in de potentiële energie die nodig is om een bepaalde lading te verplaatsen in een elektrisch veld. Veel interessanter is het om de potentiële energie te weten die nodig is per eenheid van lading. Deze grootheid wordt uitgedrukt door het symbool V en wordt alleen bepaald door het eigenschap van het elektrisch veld.
Arbeid en energie zijn scalaire grootheden, dus zonder vectoriële richting, zodat ook het elektrisch potentiaalverschil een zuiver scalaire eenheid is. Als eenheid werd de Volt (V) gekozen, die overeen komt met Newton-meter per Coulomb. Aangezien één Nm meestal wordt vervangen door één Joule, kan de eenheid van elektrisch potentiaalverschil ook worden geschreven als J/C.

Definitie van de Volt
Het voorgaande kan kort en krachtig worden samengevat. Als er een potentiaal verschil bestaat van 1 V tussen twee plaatsen in een elektrisch veld, dan kost het één Joule aan energie om een lading van één Coulomb van het ene naar het andere punt te verplaatsen. Maar omgekeerd kan natuurlijk ook gesteld worden dat 1 V de hoeveelheid energie voorstelt, die het heersende elektrisch veld moet verrichten om de eenheidslading van het andere naar het ene punt te verplaatsen. Beide definities zijn complementair, maar de tweede drukt uiteraard veel beter uit dat het begrip elektrisch potentiaal of elektrische spanning in wezen niets meer of min-

2.5 Lading, veld, capaciteit en potentiaal

der is dan een indicatie voor een hoeveelheid verrichte energie.

Een nieuwe definitie van elektrische veldsterkte
De elektrische veldsterkte E werd gedefinieerd als de evenredigheidsfactor tussen een lading Q en de kracht F die op de lading wordt uitgeoefend:
$$F = E \cdot Q$$
waaruit volgt:
$$E = \frac{F}{Q}$$
Als men een lading Q van A naar B wil verplaatsen en tussen beide punten staat een potentiaal verschil van V, dan moet daarvoor een arbeid verricht worden van:
$$W = Q \cdot V$$
Die arbeid kan echter ook uitgedrukt worden als de noodzakelijke kracht F maal de verplaatsing s:
$$W = F \cdot s$$
Beide formules drukken dezelfde grootheid uit, dus:
$$Q \cdot V = F \cdot s$$
Hieruit volgt:
$$\frac{F}{Q} = \frac{V}{s}$$
De linker term van deze formule is gelijk aan de elektrische veldsterkte E. Deze is dus gelijk aan V gedeeld door s, met andere woorden men kan de elektrische veldsterkte ook uitdrukken in de eenheid Volt per meter (V/m).

Elektrisch potentiaal ten opzichte van de aarde
Uit de definitie van het potentiaalverschil volgt duidelijk dat deze grootheid steeds een ***verschil*** uitdrukt tussen de potentialen op twee verschillende plaatsen in een elektrisch veld. Nu is dat een beetje een onhandige definitie. Vandaar dat men in de meeste gevallen aan een van de punten een energie van 0 toekent. Het potentiaalverschil wordt dan herleid tot het potentiaal zonder meer. Dat is dan het potentiaal op één punt ten opzichte van een referentiepunt, waarvan het potentiaal op 0 wordt gesteld. In wezen doet het er niet toe welk punt men als nulreferentie gebruikt. In de theoretische elektriciteitsleer wordt meestal een punt “in het oneindige” genomen. In de praktijk van alledag werkt men echter steeds met het potentiaal van de aarde als nulreferentie. Deze kan als constant beschouwd worden, omdat bij elektrische metingen steeds direct of indirect met de invloed van de aarde rekening gehouden moet worden. Men spreekt dan van “spanning ten opzichte van de aarde” en het is deze grootheid die in de praktische elektriciteit en elektronica door het leven gaat als spanning. Het zal duidelijk zijn dat het in theorie niet mogelijk is om te spreken van het potentiaal of de spanning op een welbepaald punt. Dat kan alleen als men de aarde als referentie beschouwd. Iedere spanning wordt dan uitgedrukt ten opzichte van het nulpotentiaal van de aarde.

Het begrip Elektronvolt
Tot slot zij nog vermeld dat naast de Volt ook de eenheid Elektronvolt (eV) wordt gebruikt voor het uitdrukken van elektrische potentiële energie. Een energie van 1 eV wordt verricht als de lading van één elektron wordt verplaatst tegen een potentiaalverschil van 1 V.
Omdat de lading van een elektron gelijk is aan $1{,}60218 \cdot 10^{-19}$ C, kan men dus zonder meer stellen dat de energie van 1 eV gelijk is aan $1{,}60218 \cdot 10^{-19}$ J.
Het begrip eV wordt niet vaak gebruikt in de elektronica, maar des te meer in de

moderne natuurkunde. Als elektronen en protonen versneld worden in versnellers gaat hun energie stijgen. Dergelijke energieën worden steeds uitgedrukt in eV.

Capaciteit

Definitie

Onder capaciteit verstaat men de verhouding tussen de lading op een geleider en zijn potentiaal ten opzichte van de aarde. Die verhoudingsfactor heeft als symbool C en als eenheid de Farad F. Deze eenheid is genoemd naar de wetenschapper Faraday, die zo veel heeft bijgedragen aan de inzichtvorming rond lading en veld. Men zou dus kunnen stellen dat de capaciteit van een geleider een maat is voor hoeveel lading die geleider kan bevatten bij een gegeven potentiaal. Hoe groter de capaciteit, hoe meer lading er in de geleider opgeslagen kan worden! In formulevorm uitgedrukt wordt deze definitie:

$$Q = C \cdot V$$

of:

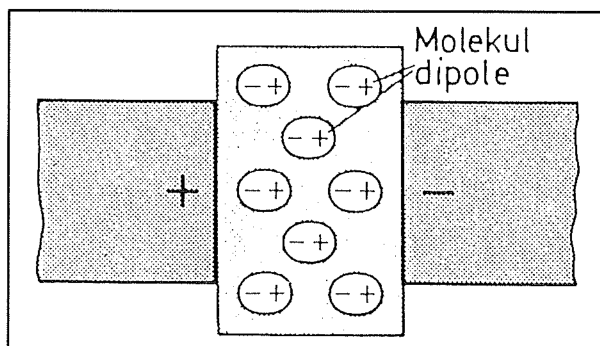
$$C = \frac{Q}{V}$$

De Farad

Een geleider heeft een capaciteit van 1 Farad als er tussen deze geleider en de aarde een potentiaal van 1 Volt staat en de geleider opgeladen is tot een lading van 1 Coulomb. Nu is deze eenheid veel te groot, zodat steeds met de deelfactoren µF, nF en pF gewerkt wordt, voluit microfarad, nanofarad en picofarad.

Het diëlektricum

Tot nu toe is steeds aangenomen dat geleiders leven in een ruimte waar niets aanwezig is, het zogenoemde absolute vacuüm. In de praktijk zal dat natuurlijk nooit het geval zijn. Tussen de geleiders bevindt zich bijvoorbeeld lucht of een of andere isolator. Deze stof die tussen de geleiders zit noemt men het diëlektricum. Dit feit heeft tot gevolg dat alle formules die zijn opgesteld voor het vacuüm niet meer gelden! Want wat is het geval?
Zoals uit figuur 12/8.4-18 blijkt zullen de atomen en moleculen, waaruit het diëlektricum is samengesteld, een invloed ondervinden van het elektrisch veld tussen beide geladen geleiders. Vrije ladingsdragers, die ook in absolute isolatoren toch nog steeds aanwezig zijn, zullen zich onder invloed van het veld gaan richten. Er ontstaan zogenoemde moleculaire dipolen, het verschijnsel waardoor deze dipolen ontstaan noemt men diëlektrische polarisatie. Door deze polarisatie wordt een deel van de op de geleiders aanwezige ladingen geneutraliseerd.
Het gevolg is dat het potentiaal van de ene geleider ten opzichte van de andere gaat dalen. Men kan dit ook anders uitdrukken: als de lading tussen de geleiders identiek blijft, dan heeft dit tot gevolg dat het potentiaalverschil groter wordt.



Figuur 3/2.5-18: De invloed van het diëlektricum op de eigenschappen van twee geladen geleiders: er ontstaan moleculaire dipolen, die de ladingsverdeling beïnvloeden.

2.5 Lading, veld, capaciteit en potentiaal

Isoleerstof	*Handelsbenaming*	ϵ_r
Asfalt		2,7- 3,1
Barnsteer		2,7- 2,9
Caseïne	Erinoid	6,4
Cellulose-Acetaat	Bakeliet	6 - 8
Cellulose-Nitraat	Celluloïd-Cellophaan	4 - 7
Eboniet		3
Fiber		2,5- 5
Glas		4 - 5
Glas (pyrex)		4,5
Kwarts		3,5- 4,2
Lucht (normale druk)		1
Magnesiumsilikaat		5,9-66,4
Mica		2,5- 8
Micalex		6 - 8
Nylon		3,6
Papier		2 - 2,6
Parafine Olie		2,2
Pertinax	Pertinax	5,4
Phenol-formaldehyde	Bakeliet-Paxolin-Duferite Formica-Synthane	5
Phenol (gele)	HF bakeliet	5,3
Phenol (zwarte gegoten)	Amphenol	5,5
Polyethyleen	Polyteen	2,25
Polystrol	Styroflex	2,3- 2,9
Polystyreen	Polystyreen-Trolitul	2,5
Polyvinylchloride	Nylex-PVC	2,9- 3,2
Porcelein		6,5- 7
Rubber (harde)		2 - 3,5
Shellak		2,5- 4
Steatie-handels		4,9- 6,5
Steatiet-„low-loss"		4,4
Titanium dioxyde	Rutiel	90 -170
Ureum formaldehyde		5 - 7
Vinylhars		4
Was (natuurlijke)		2,5- 2,6
Was (parafine)		2,25
Was (syntetische)	Halowax	3,4- 3,8

Figuur 3/2.5-19: De relatieve diëlektrische constante ϵ_r voor vaak gebruikte isolerende materialen.

De diëlektrische constante

De invloed van het diëlektricum kan (gelukkig) ingecalculeerd worden door slechts één extra factor in de formules op te nemen. Deze factor noemt men de diëlektrische constante, die wordt voorgesteld door het Griekse symbool epsilon, ε. In feite bestaat deze term uit twee deelfactoren, de absolute diëlektrische constante ε_0 en de relatieve diëlektrische constante ε_r. In formulevorm:

$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$

De absolute constante is geldig als wordt gerekend aan capaciteiten die lucht als diëlektricum hebben, de relatieve constante geeft aan hoeveel keer de capaciteit

Capaciteit van lichamen t.o.v. op eindige afstand gelegen aarde		
	bol $d \ll 2h$	$C = \frac{2\pi\varepsilon d}{1+\frac{d}{4h}}$
	hor. cilinder $d \ll 2l$ $d \ll 2l$ en $4h \ll l$	$C = \frac{2\pi\varepsilon l}{\ln\left\{\frac{2l}{d}\left[\frac{\sqrt{l^2+16h^2}-l}{\sqrt{l^2+16h^2}+l}\right]^{\frac{1}{2}}\right\}}$ $C = \frac{2\pi\varepsilon l}{\ln\frac{4h}{d}}$
	hor. cilinder $2h \ll l$ $2h \ll l$ en $d \ll 2h$	$C = \frac{2\pi\varepsilon l}{\ln\left\{\frac{2h+\sqrt{4h^2-d^2}}{d}\right\}}$ $C = \frac{2\pi\varepsilon l}{\ln\frac{4h}{d}}$
	vert. cilinder $R \ll l$ $R \ll l$ en $4h \ll l$	$C = \frac{2\pi\varepsilon l}{\ln\left\{\frac{2l}{d}\left[\frac{4h+l}{4h+3l}\right]^{\frac{1}{2}}\right\}}$ $C = \frac{2\pi\varepsilon l}{\ln\frac{2l}{\sqrt{3}d}}$

Figuur 3/2.5-20: Het berekenen van de capaciteit van voorwerpen ten opzichte van de aarde.

vergroot moet worden om identieke ladingen te krijgen als men iets anders gebruikt dan lucht als diëlektricum. Het zal dus duidelijk zijn dat ε_r voor lucht gelijk is aan 1. In de tabel van figuur 3/2.5-19 is de relatieve diëlektrische constante voor enige diëlektrische materialen gegeven.
De eenheid van de diëlektrische constante is F/m, Farad per meter. De waarde van de absolute diëlektrische constante wordt gegeven door:

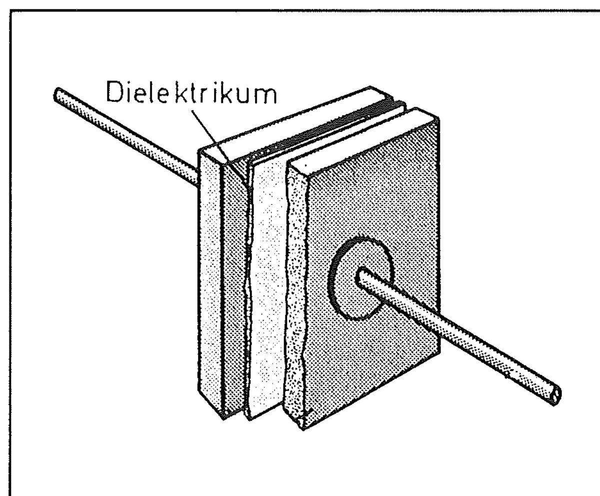
$$\varepsilon_0 = 10^{-9}/36.\pi \text{ F/m}$$

Hierin is π uiteraard "pi", het bekende getal van Pythagoras, gelijk aan 3,1416....
Uitgerekend levert dit een waarde voor ε_0 op van $8{,}885.10^{-12}$ F/m.

Berekenen van de capaciteit ten opzichte van de aarde
De capaciteit tussen een ruimtelijk voorwerp en de aarde is alleen afhankelijk van de vorm van het voorwerp en de diëlektrische constante van het materiaal tussen de geleider en de aarde. Zelfs als de vorm van het voorwerp relatief eenvoudig is en dus wiskundig goed te beschrijven, zijn de toe te passen formules toch nog ingewikkeld. Ter illustratie geeft de tabel van figuur 3/2.5-20 de capaciteitsformules voor een bol, een horizontale en een vertikale cilinder.

Van puntlading naar ruimtelading
De wet van Coulomb geldt alleen voor puntladingen in het absolute vacuüm. Nu is dat een voorbeeld dat men zelden tot nooit in de praktijk zal aantreffen. In de meeste gevallen zullen ladingen ruimtelijk over een voorwerp verdeeld zijn. Twee geleidende voorwerpen, die op een bepaalde afstand van elkaar staan opgesteld, noemt men een condensator. De afstand tussen beide platen is natuurlijk weer opgevuld met een of ander diëlektricum.

De vlakke condensator
De meest eenvoudige uitvoering van een condensator is de vlakke condensator. De ruimtelijke structuren zijn twee even grote volledig vlakke geleidende platen, die bovendien evenwijdig ten opzichte van elkaar staan opgesteld. Natuurlijk kunnen deze twee platen opgeladen worden en de vraag die aan de orde komt is hoe het dan zit met de capaciteit tussen beide platen. Nu kan immers niet meer een punt op de aarde of in het oneindige als nulreferentie worden gebruikt. In figuur 3/2.5-21 is een dergelijke vlakke condensator getekend.



Figuur 3/2.5-21: De vlakke condensator bestaat uit twee vlakke geleiders, platen genoemd, van elkaar gescheiden door het diëlektricum.

De capaciteit van een vlakke condensator kan gemakkelijk berekend worden uit de formule:

$$C = \frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot A}{d}$$

Hierin stelt A het oppervlak van de platen voor en d de afstand tussen beide platen.
De lading over een plaatcondensator wordt nog steeds gegeven door de reeds bekende uitdrukking:

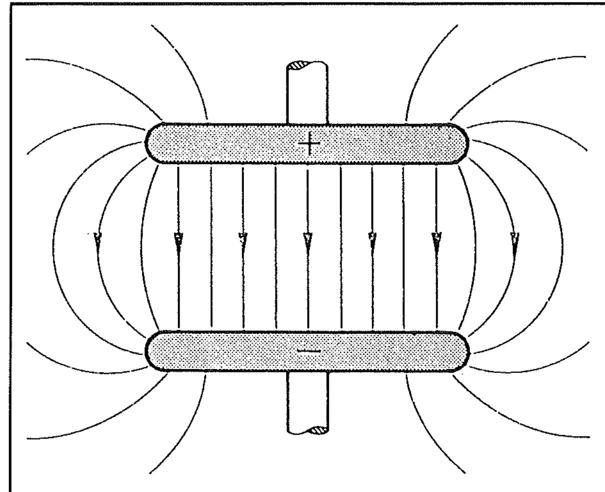
$$Q = C \cdot V$$

2.5 Lading, veld, capaciteit en potentiaal

Het elektrisch veld is tussen beide platen aanwezig onder de vorm van evenwijdig lopende veldlijnen. Aan de randen van de platen lopen de veldlijnen steeds meer cirkelvormig weg. Het veld in en rond een vlakke condensator is getekend in figuur 3/2.5-22.
De veldsterkte in een vlakke condensator wordt gegeven door de uitdrukking:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{d}}$$

waarbij U staat voor het potentiaalverschil over de condensator en d voor de afstand tussen de platen.



Figuur 3/2.5-22: De verdeling van de veldlijnen in en rond een vlakke condensator.

3/2.6

Spanning, stroom, weerstand en vermogen

Inleiding

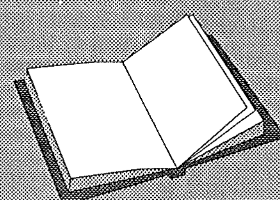
Van theorie naar praktijk
In de vorige hoofdstukken is een poging ondernomen het verschijnsel "elektriciteit" in het kader van de heelalwetten te plaatsen. Fundamentele begrippen, zoals "kracht" en "veld" werden elektrisch vertaald, hetgeen leidde tot een definitie van de begrippen "potentiaal", "elektrisch veld", "elektrische lading" en "capaciteit". Vier begrippen die het wezen van de elektriciteit en van de elektronica bepalen. Maar nog steeds vier vrij abstracte begrippen, die weinig te maken hebben met de praktijk van de elektronica doe-het-zelver. In dit hoofdstuk wordt de overstap gemaakt naar de praktijk. In hoofdstuk 3/2.5 werd reeds een bruikbare definitie gegeven van het alledaagse begrip "spanning". Van "spanning" is het maar een kleine stap naar begrippen als "stroom", "weerstand" en "vermogen". En dat zijn drie begrippen waar iedereen die in het lab werkt dagelijks mee te maken krijgt!

Spanning

Definitie
Zoals reeds beschreven in hoofdstuk 3/2.5 is de elektrische spanning een hoeveelheid potentiële energie, die noodzakelijk is om elektrische ladingen te verplaatsen in een elektrisch veld. Men zou het kunnen vergelijken met een roeier, die een bepaalde krachtsin***spanning*** moet leveren om zijn bootje tegen de stroom in te verplaatsen. Hoe sterker de stroming (veld) en hoe zwaarder de boot (lading), hoe meer krachtsin***spanning*** de roeier moet leveren.

Eenheid en symbool
De eenheid van elektrische spanning is, zoals algemeen bekend, de Volt, afgekort tot V. Dit ter ere van de Italiaanse fysicus Allessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta, die leefde van 1745 tot en met 1827. Volta staat bekend als de uitvinder van de elektrische batterij, een apparaat waarmee het mogelijk was continu, zonder moeilijke toestanden, een potentiaal verschil tussen twee geleiders te creëren.

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/2.5
Hoofdstuk 3/3.22
Hoofdstuk 3/3.23
Hoofdstuk 3/3.35



2.6 Spanning, stroom, weerstand en vermogen

De wiskundige definitie van de Volt wordt gegeven door:

1 V = 1 J / 1 C = 1 N . 1 m / 1 C

In woorden: één Volt is het potentiaal verschil tussen twee geleiders dat een energie van één Joule opwekt als een lading van één Coulomb verplaatst wordt van de ene naar de andere geleider.
Het symbool voor spanning is helaas niet gestandaardiseerd. In schema's treft men de letters U en E aan, waarmee in beide gevallen spanningen worden bedoeld. Toch is er principieel een groot verschil tussen U en E!

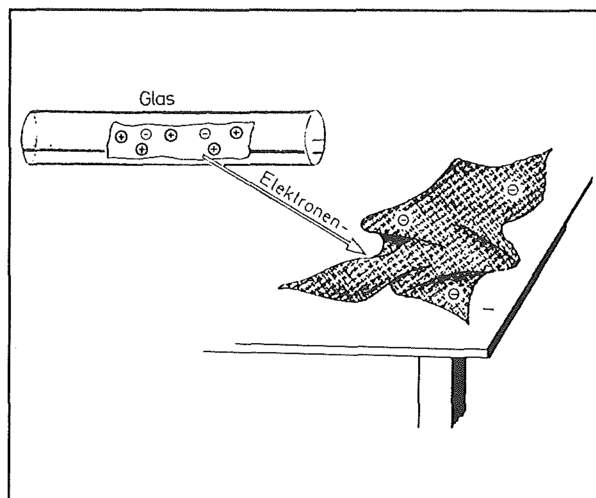
De elektromotorische kracht

Vaak leest men in artikelen die over elektronica gaan de afkorting "emk" of "tegen-emk". Dit letterwoord is de afkorting van "elektromotorische kracht", een begrip dat zeer nauw samenhangt met de definitie van elektrische spanning.
De elektromotorische kracht die een bepaald onderdeel opwekt is niets anders dan de totale energie per Coulomb, die door dit onderdeel in een bepaalde schakeling ***kan*** wordt gegenereerd. Minder ingewikkeld gesteld is de emk de elektrische spanning die aan de klemmen van een ***onbelaste*** spanningsbron beschikbaar is. Dat de spanning van een bepaalde spanningsbron afhankelijk is van de belasting, wordt duidelijk als het begrip weerstand gedefinieerd wordt. Hoe dan ook, het zal wel duidelijk zijn dat de emk eveneens in V wordt uitgedrukt. In theorie is het nu zo dat de emk van een spanningsbron moet worden voorgesteld door het symbool E, terwijl alle overige spanningen door de letter U worden aangegeven. Maar er zijn maar weinig mensen die zich aan deze afspraak houden.

Het opwekken van spanningen

Er zijn verschillende systemen ontwikkeld voor het opwekken van elektrische spanningen:
- generatie door mechanische wrijving;
- generatie door inductie;
- generatie door warmte;
- generatie door chemische actie;
- generatie door licht;
- generatie door mechanische vervorming.

Al die vormen komt men wel op de een of andere manier in de praktische elektronica tegen. Vandaar dat er in het kader van dit hoofdstuk enige aandacht wordt aan besteed.



Figuur 3/2.6-1: Het ontstaan van statische spanning door mechanische wrijving.

Generatie door mechanische wrijving

Dit is uiteraard de van ouds bekende manier om een potentiaal verschil tussen twee punten te kweken. Reeds besproken apparaten zoals de Van de Graaf generator werken op deze manier. Als men twee geschikte materialen tegen elkaar wrijft kan het gebeuren dat er elektronen van de ene stof naar de andere "overspringen". Er ontstaat een ladingsverschil en

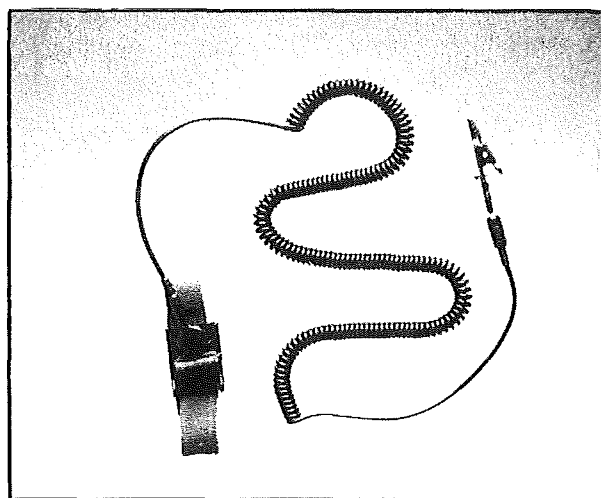
2.6 Spanning, stroom, weerstand en vermogen

dus ook een potentiaalverschil. In de meeste gevallen noemt men de op deze manier opgewekte spanning "statische spanning". Dit is voorgesteld in figuur 3/2.6-1. Wrijft men met een glazen staaf over een wollen doek, dan zullen aan atomen gebonden elektronen uit de glazen staaf naar het doek migreren. Daardoor ontstaat een spanningsverschil tussen de staaf en het doek. Nu kan men in de plaats van "glazen staaf" en "wollen doek" een heleboel andere materialen en stoffen invullen, zoals schoenzool en vloerbedekking, broek en stoelzitting, trui en shirt. Zonder dat wij het weten zijn wij vaak een centrale van statische spanning! Ons lichaam wordt vaak opgeladen tot duizenden Volt!

Generatie van statische spanningen zal men maar zelden nuttig gebruiken in de elektronica. Integendeel, het ontstaan van statische spanningen is iets waar iedere elektronicus zijn onderdelen en schakelingen op alle mogelijke manieren tegen moet beschermen! Zeker tegenwoordig, nu zeer ingewikkelde geïntegreerde schakelingen miljoenen transistoren bevatten, die ieder maar een paar duizendsten van een millimeter groot zijn, kunnen statische spanningen echte rampen aanrichten. Vandaar dat de meeste IC's tegenwoordig geleverd worden op stukjes geleidend schuimrubber, die er voor zorgen dat alle aansluitpennetjes op hetzelfde potentiaal staan. Dergelijk "conductive foam" heeft een specifieke weerstand van 10^5 Ω/cm, hetgeen laag genoeg is om statische spanningen kort te sluiten. Als men op de verpakking van elektronische onderdelen het symbooltje ziet dat in figuur 3/2.6-2 is voorgesteld, weet men dat men zeer voorzichtig met het onderdeel moet omgaan en in ieder geval statische spanningen moet voorkomen.



Figuur 3/2.6-2: Het symbooltje, waarmee wordt aangegeven dat een elektronisch onderdeel zeer gevoelig is voor statische spanningen.



Figuur 3/2.6-3: Een aardingsarmband is een goedkoop middel om elektronische onderdelen te beschermen tegen statische spanningen.

Zo'n onderdeel kan al beschadigd raken als men de behuizing met de ene hand vast pakt en met de andere hand een pennetje aanraakt. Om dergelijke rampen te voorkomen bestaat er een aantal eenvoudige en goedkope hulpmiddelen. Die hulpmiddelen hebben allemaal een simpel principe: zorg ervoor dat alles in de buurt van het onderdeel op een gelijk

potentiaal staat. Dan zijn er geen potentiaal verschillen en kan er dus ook geen sprake zijn van statische spanningen. In figuur 3/2.6-3 wordt een van de eenvoudigste middeltjes voorgesteld in de strijd tegen statische spanningen: een aardingsarmband. De armband bestaat uit een geleidend materiaal en wordt met een kabeltje met krokodilklem geleverd. Deze klem wordt verbonden met een mat van geleidend rubber, zie figuur 3/2.6-4, die op de laboratoriumtafel ligt. Het geheel wordt dan nog eens verbonden met de aarding van de aanwezige meetapparatuur.

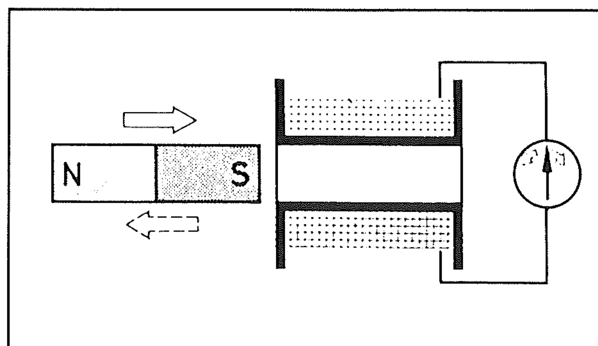


Figuur 3/2.6-4: Een complete set tegen statische spanningen.

De set van figuur 3/2.6-4, bestaande uit een aardingsarmband, een geleidende mat en de nodige verbindingssnoertjes, kost ongeveer *f* 150,00. Een heel bedrag, maar een investering die op de lange termijn een schadepost van honderden guldens aan vernielde componenten kan voorkomen!

Generatie door inductie

Het principe van het opwekken van spanning door middel van inductie is getekend in figuur 3/2.6-5. Als men een spoel of een enkele draad beweegt in een magnetisch veld, dan zal er in de spoel of in de draad een spanning ontstaan. Er ontstaat steeds een inductiespanning als een draad in een ***variërend*** magnetisch veld wordt aangebracht. In het voorbeeld ontstaat dat variërend veld door de verplaatsing van de magneet naar en van de spoel. Een bekend gegeven, dat bijvoorbeeld op iedere fiets gebruikt wordt om de spanning te genereren voor het voeden van de lampjes. Maar ook de allergrootste elektrische centrales werken volgens dit principe. In de elektronica krijgt men vaak met inductie te maken.



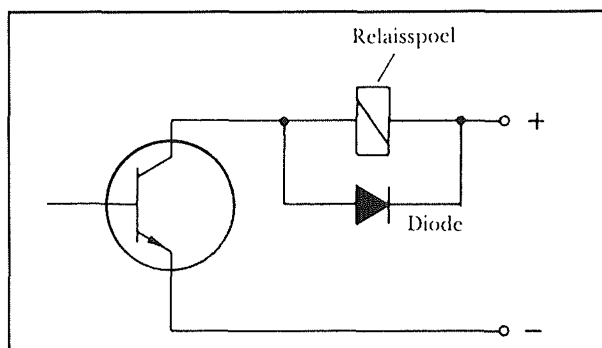
Figuur 3/2.6-5: Het genereren van spanning door inductie.

Bekende onderdelen die volgens dit principe werken of er op de een of andere manier gebruik van maken zijn de transformator, het gekoppeld LC-filter, de microfoon en het aloude magneto-dynamische element van de al even stokoude platendraaier.

Maar er is nog een ander verschijnsel, waar de elektronicus vaak mee te maken heeft en dat op inductie stoelt: de tegenemk van een spoel. Als men een relaisspoel bekrachtigt door er een stroom

2.6 Spanning, stroom, weerstand en vermogen

doorheen te sturen, zal deze stroom rond de spoel een magnetisch veld opbouwen. Stel nu dat men de stroom opeens tot nul reduceert. Op dat moment is het magnetisch veld nog aanwezig. Maar omdat de oorzaak van dit veld, de stroom, is weggevallen, zal ook het veld verdwijnen. Op dat moment bevindt de spoel van het relais zich in een ***variërend*** magnetisch veld, met als gevolg dat er in de spoel een inductiespanning wordt opgewekt. Deze inductiespanning kan vele malen groter zijn dan de voedingsspanning van de elektronische schakeling. Het gevaar bestaat dat sommige onderdelen niet tegen deze inductiespanning bestand zijn en doorslaan. Deze inductiespanning noemt men de "tegen elektromotorische kracht" van het relais, een mondvol dat meestal wordt afgekort tot "tegen-emk" of zelfs "temk". Het is absoluut noodzakelijk maatregelen te treffen die het ontstaan van deze temk moeten verhinderen. Dat kan gelukkig heel eenvoudig, door over de spoel van het relais een diode te schakelen. Hoe dat moet is getekend in figuur 3/2.6-6.

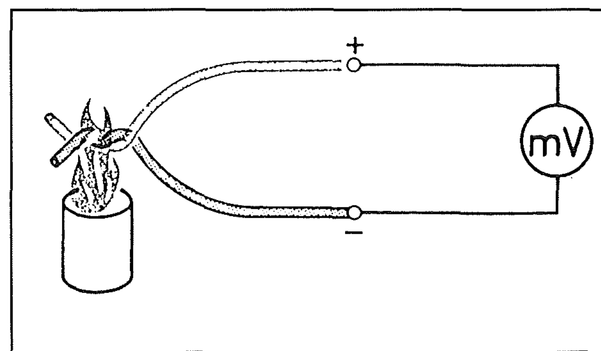


Figuur 3/2.6-6: Het beveiligen van een transistor tegen de inductiespanning die in de spoel van een relais wordt opgewekt.

De diode staat natuurlijk zo geschakeld, dat deze spert voor de normale stroomrichting in de schakeling. De temk wekt een spanning op die tegengesteld gepolariseerd is dan de voedingsspanning. De aansluiting van de relaisspoel die met de collector van de transistor verbonden is wordt dus positief ten opzichte van de voedingsaansluiting. De diode gaat dan geleiden en sluit de temk op een zeer effectieve manier kort.

Generatie door warmte

Natuurlijk kan men stellen dat in iedere elektrische centrale spanning wordt opgewekt door warmte. Maar dit is een indirect proces, waar de warmte eerst stoom vol thermische energie stopt, die nadien een turbine aan het draaien zet. Bedoeld worden processen, waarbij warmte rechtstreeks in spanning wordt omgezet. Het principe is getekend in figuur 3/2.6-7. Als men twee draden, gemaakt uit verschillend metaal, in elkaar draait en deze verbinding flink opwarmt, zal men merken dat er tussen beide draden een kleine spanning ontstaat.



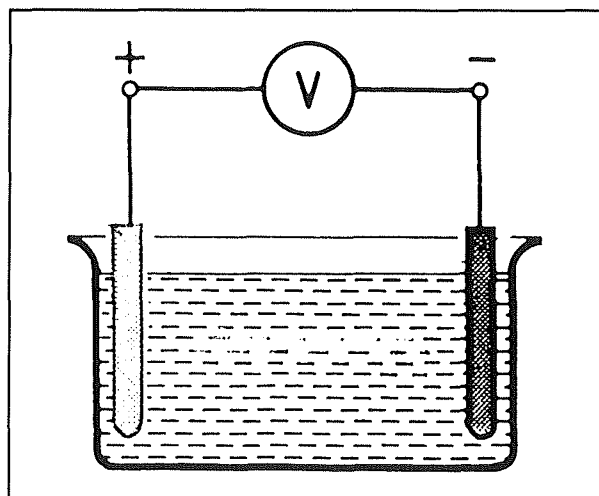
Figuur 3/2.6-7: Het genereren van een spanning door warmte.

De opgewekte spanning is zeer klein, vaak niet meer dan enige tientallen mV, maar goed meetbaar. Een van de bekendste toepassingen van dit verschijnsel zijn de "thermo-koppels", onderdelen die gebruikt worden voor het meten van hoge temperaturen.

Maar alweer is er aan dit op zich zeer nuttige verschijnsel een vervelend neveneffect verbonden. Als men een koperen draadje vast schroeft in een printkroonsteentje, waarvan het metalen deel uit vertind messing bestaat, dat ontstaat er dus ook een thermo-koppel! Bij sommige zeer gevoelige schakelingen, die zeer kleine gelijkspanningen moeten versterken, kan dit problemen veroorzaken. Een ander onverwacht neveneffect kan ontstaan bij het monteren van elektronische schakelingen in behuizingen. Als men een kast uit aluminium maakt en de onderdelen van deze kast met messing boutjes en moertjes in elkaar schroeft, dan vormt iedere messing/aluminium-overgang in wezen een thermo-koppeltje, dat zichzelf bovendien kortsluit. De kleine spanningen die als gevolg hiervan ontstaan kunnen in vochtige omgevingen tot corrosie van aluminium en/of messing leiden! Bij professionele behuizingen zal men merken dat men de contactoppervlakken tussen twee metalen isoleert door er een teflon of nylon ringetje tussen te monteren.

Generatie door chemische actie

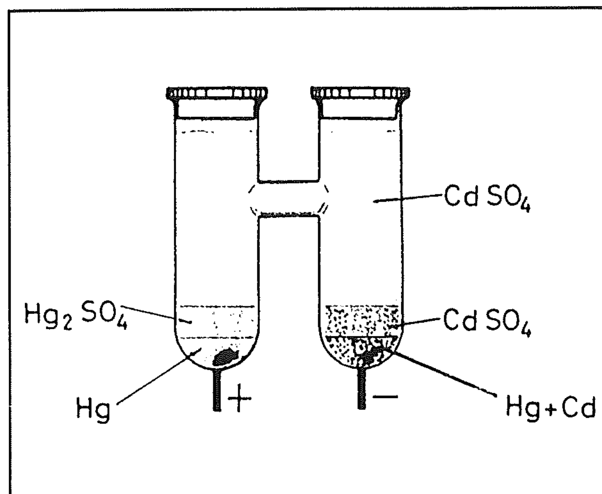
Natuurlijk ook al een bekend gegeven, want iedere batterij, cel of accu maakt er gebruik van. Het principe is getekend in figuur 3/2.6-8 en berust op het galvanisch principe. Twee verschillende metalen, gedompeld in een elektrisch geleidende oplossing, genereren een kleine spanning.
In de moderne elektronica treft men vooral nikkel/cadmium-cellen aan, afgekort tot NiCad's, die van dit principe gebruik maken. NiCad's worden gebruikt als bufferbatterij om bepaalde delen van een elektronische schakeling van spanning te voorzien, ook als de hoofdvoeding is uitgeschakeld. Dat geldt voor geheugens, waar belangrijke gegevens in opgeborgen zitten, maar bijvoorbeeld ook voor het tijd/datum-IC dat tegenwoordig in iedere computer aanwezig is en de juiste datum en tijd levert.



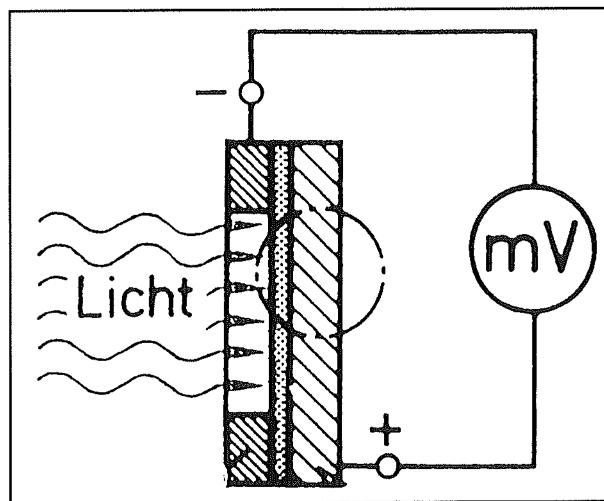
Figuur 3/2.6-8: Het principe van spanningsopwekking via chemische actie.

Een andere toepassing van het galvanisch principe treft men aan in de zogenoemde "normaal-cel" of Weston-cel. Zoals getekend in figuur 3/2.6-9 bestaat dit galvanisch element uit twee kolommen. De positieve elektrode bestaat uit zuiver kwik (Hg), de tweede uit een legering van kwik en cadmium. Beide elektroden worden bedekt met een pasta-achtige substantie, die enerzijds bestaat uit kwiksulfaat Hg_2SO_4 en anderzijds uit cadmiumsulfaat $CdSO_4$. De constructie wordt gevuld met een verzadigde oplossing van cadmiumsulfaat. Bij 20 °C geeft deze cel een spanning af van precies 1,01835 V. Dergelijke cellen worden nog vaak toegepast om meetapparatuur, zoals digitale voltmeters met een hoge resolutie, te ijken. Wel mag de cel met niet meer dan 10 nA belast worden.

2.6 Spanning, stroom, weerstand en vermogen



Figuur 3/2.6-9: De Weston-cel wordt gebruikt als spanningsreferentie.



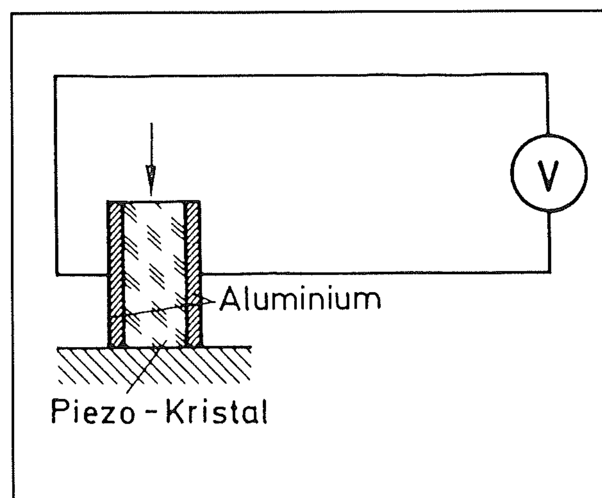
Figuur 3/2.6-10: Het genereren van spanning in een foto-elektrisch element.

Generatie door licht

Ook dat is een principe dat in de moderne elektronica vaak gebruikt wordt. Denk maar aan zonnecellen, waarmee het op dit moment mogelijk is rendabele spanningsvoorziening voor boten, caravans en zomerhuisjes te maken. De werking van dergelijke cellen is vrij complex en wordt verklaard door het foto-elektrisch verschijnsel. Het komt er op neer dat het invallend licht weer elektronen uit atomen bevrijd, die vanwege hun snelheid door een sperlaag dringen. Op deze manier ontstaat een potentiaal verschil over de cel, hetgeen zich uiteraard uit onder de vorm van een spanning.

Generatie door mechanische vervorming

Als men, zie figuur 3/2.6-11, bepaalde kristallen tussen twee geleidende plaatjes monteert en nadien een mechanische druk op het kristal uitoefent, zal men vaststellen dat er tussen de twee geleidende plaatjes een spanning ontstaat. Dit verschijnsel staat bekend als het piëzo-elektrische effect, een woord dat is afgeleid van het oud-Griekse woord piedein, hetgeen drukken betekent. Deze manier van spanningsgeneratie wordt in de elektronica gebruikt bij kristalmicrofoons en bij sommige druksensoren.



Figuur 3/2.6-11: Genereren van een spanning met behulp van het piëzo-elektrische effect.

Stroom

Definitie

Een elektrische stroom ontstaat als vrije elektronen zich, gemiddeld genomen, al-

lemaal in een en dezelfde richting door een geleider bewegen. Dat kan alleen maar gebeuren als tussen de twee uiteinden van die geleider een potentiaal verschil aanwezig is. Het elektrisch veld dat hiervan het gevolg is, zal er voor zorgen dat de vrije elektronen een kracht in een bepaalde richting ondervinden, waardoor de beweging op gang komt. Uit deze definitie volgt, dat stroom altijd ***een gevolg*** is van de aanwezigheid van een spanning! Zonder spanning geen stroom, maar wel spanning zonder stroom.

Eenheid en symbool

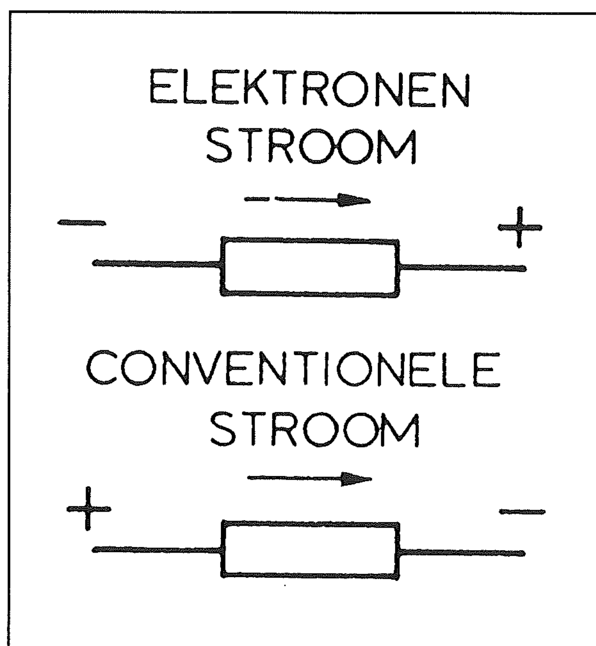
De eenheid van elektrische stroom is de Ampère, genoemd naar de Franse wis- en natuurkundige André Marie Ampère en wordt afgekort tot A. Eén Ampère is de sterkte van een ***constante*** elektrische stroom die vloeit als er gedurende één seconde een elektrische lading van één Coulomb langs een bepaald punt in een geleider verplaatst wordt:

$$A = Q / t$$

Het algemeen gebruikelijke symbool voor elektrische stroom is I.

De richting van de stroom

Met de richting van de stroom is iets raars aan de hand. Zoals waarschijnlijk algemeen bekend, stelt men dat de elektrische stroom van de positieve pool van een spanningsbron via de belasting afvloeit naar de negatieve pool. Toch is dit in strijd met de theorie. Elektronen vloeien immers steeds van een punt waar er te veel elektronen zijn naar een punt waar er te weinig zijn. Met andere woorden, elektronen vloeien steeds van een punt met een bepaald potentiaal naar een ander punt dat in ieder geval een positiever potentiaal heeft! De richting van de stroom, zoals deze steeds wordt gebruikt om de werking van een elektronische schakeling te doorgronden, is dus tegengesteld aan de richting van de elektronen! Deze tegenstelling heeft historische gronden en is nooit recht gezet. Het vreemde is nu dat het zeer gemakkelijk is om bijvoorbeeld de werking van een transistor te verklaren als men uitgaat van de (onrealistische) stroomrichting van plus naar min, maar het heel moeilijk is om de werking van diezelfde transistor te verklaren als men uit gaat van de reële elektronenstroom. Omdat het voor sommige toepassingen toch noodzakelijk is duidelijk te definiëren welke stroom men bedoeld heeft men de twee begrippen "elektronenstroom" en "conventionele stroom" ingevoerd. Hoe deze twee stromen door een schakeling vloeien, voor te stellen door één weerstand, is getekend in figuur 3/2.6-12.



Figuur 3/2.6-12: De richting van de elektronenstroom en van de conventionele stroom door een verbruiker.

2.6 Spanning, stroom, weerstand en vermogen

Stroomdichtheid

De definitie van de Ampère doet geen uitspraak over het oppervlak, waardoor de lading vloeit. Een stroom van 1 A ontstaat zowel als een lading van 1 Q zich gedurende 1 s door een flinterdun draadje perst als door een boomstam dikke geleider. Nu zal het duidelijk zijn dat de ene stroom toch iets andere effecten heeft dan de tweede! Vandaar heeft men een nieuwe grootheid bedacht, de stroomdichtheid s. De stroomdichtheid geeft aan hoeveel Ampère stroom er door een bepaald oppervlak A van een geleider vloeit. In de meeste gevallen werkt men met een standaard oppervlak van 1 mm^2, zodat deze stroomdichtheid wiskundig gedefinieerd kan worden als:

$$s = I / A$$

De stroomdichtheid wordt bijgevolg uitgedrukt in A/mm^2.
De toelaatbare stroomdichtheid voor koperen geïsoleerde geleiders bedraagt bij een omgevingstemperatuur van 25 °C ongeveer 16 A/mm^2. Wordt de stroomdichtheid groter, dan zal de geleider te warm worden, waardoor de eigenschappen van de isolatie kunnen degenereren en de geleider onbetrouwbaar wordt.

Even terug naar de Volt

In hoofdstuk 3/2.2 werden de vijf fundamentele grootheden lengte, massa, tijd, stroom en temperatuur besproken en werd gesteld dat alle overige grootheden in principe tot deze vijf grootheden te herleiden zijn. Hoe zit dit nu met de spanning? Aan de hand van de tot nu toe vergaarde wiskundige kennis kan op een eenvoudige manier aangetoond worden dat de spanning inderdaad is te herleiden tot de fundamentele grootheden.

Een potentiaal verschil van één Volt komt overeen met een arbeid van één Joule, die wordt geleverd om een lading van één Coulomb te verplaatsen:

$$V = J / C$$

Maar één Joule is gelijk aan één Newtonmeter en één Coulomb is gelijk aan een stroom van één Ampère, die gedurende één seconde vloeit:

$$V = N . m / A . s$$

Eén Newton is echter weer gelijk aan de kracht die een massa van één kilogram een versnelling geeft van één meter per seconde kwadraat:

$$V = (kg) . (m / s^2) . (m) / (A) . (s)$$

Natuurlijk kan men meter maal meter vervangen door meter in het kwadraat en seconde maal seconde in het kwadraat door seconde tot de derde macht:

$$V = kg . m^2 / A . s^3$$

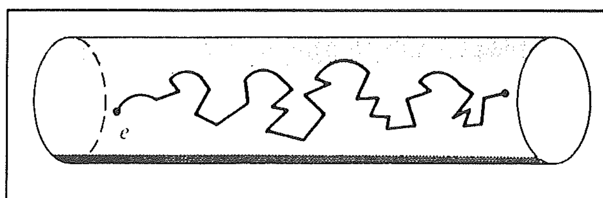
Hiermee is dus de eenheid van elektrische spanning, de Volt, volledig uitgedrukt in de fundamentele grootheden massa, lengte, stroomsterkte en tijd.

Weerstand

Niets gaat zonder wrijving

De elektronen die door een geleider vloeien, bewegen zich alles behalve volgens rechte banen. Die energierijke elektronen botsen op hun tocht immers voortdurend tegen duizenden atomen, waardoor zij worden afgebogen en in feite een tame-

lijk zigzzaggende baan volgen, zie figuur 3/2.6-13.



Figuur 3/2.6-13: De tamelijk willekeurige baan van een elektron door een geleider verklaart het ontstaan van weerstand.

De vrije elektronen worden dus in hun beweging gehinderd, het is net alsof het materiaal van de geleider ***weerstand biedt*** tegen het vloeien van de elektronenstroom. De mate van weerstand hangt af van de eigenschappen van de geleider en van de temperatuur. Een geleider, die gemaakt is van zuiver koper zal bijvoorbeeld minder weerstand bieden tegen de stroom dan een geleider die gemaakt is van verontreinigd koper. Het lijkt dus alsof ieder materiaal de elektrische stroom op een eigen, specifieke manier zal geleiden.

Georg Simon Ohm
Het verschijnsel van elektrische weerstand is uitvoerig onderzocht door de Duitse natuurkundige Georg Simon Ohm. In 1826 ontdekte hij proefondervindelijk een verband tussen de stroomdichtheid s door een geleider en de elektrische veldsterkte F over de geleider. Dat verband was lineair, zodat Ohm een heel eenvoudige wet kon opstellen:

$$s = \sigma \cdot F$$

De evenredigheidsfactor σ tussen stroomdichtheid en veldsterkte wordt het specifieke geleidingsvermogen van de geleider genoemd. σ is een griekse letter, die wordt uitgesproken als "sigma".
Dit is een zeer belangrijke wet uit de elektriciteitsleer, die de ***algemene wet van Ohm*** wordt genoemd. Toch zullen maar weinig elektronici de beroemde wet van Ohm in deze formule herkennen!

De praktische wet van Ohm
Het was Ohm's grote verdienste dat hij gezocht heeft naar een mogelijkheid om het specifieke geleidingsvermogen van stoffen uit te drukken in de dagelijkse eenheden Ampère en Volt. Dat gaat eigenlijk heel gemakkelijk.
- De veldsterkte F kan uitgedrukt worden als spanning per meter, dus U/s (zie hoofdstuk 3/2.5).
- De stroomdichtheid s kan uitgedrukt worden als stroom per oppervlak, dus I/A (zie hoger).

Als men nu die twee formules invult in de algemene wet van Ohm ontstaat:

$$I / A = \sigma \cdot U / s$$

of:

$$U / I = s / A \cdot \sigma$$

De term $s/A.\sigma$ geeft dus de verhouding tussen de spanning over en de stroom doorheen een geleider. Ohm voerde hiervoor een nieuwe eenheid in, de elektrische weerstand, voorgesteld door het symbool R. De eenheid van deze nieuwe grootheid werd de Ohm oftewel de Ω. De formule kan dus vereenvoudigd worden tot:

$$U / I = R$$

Dit is de algemeen bekende vorm van de wet van Ohm, een formule die ongetwij-

feld net zo beroemd en bekend is als Einstein's $E = m \cdot c^2$!

De betekenis van de wet van Ohm
De wet van Ohm geeft een zeer eenvoudige methode om stromen te berekenen, als de spanningen en de weerstanden bekend zijn. Omgekeerd kan men op dezelfde eenvoudige manier spanningen berekenen als de stromen en de weerstanden bekend zijn. De wet van Ohm is echter geen fundamentele wet der natuur, maar een zogenoemde "empirische wet". Een wet die is opgesteld naar aanleiding van talloze experimenten, die steeds tot hetzelfde resultaat aanleiding gaven. De wet van Ohm is echter niet universeel geldig! Uit de formules blijkt dat de weerstand R afhankelijk is van:
- de lengte s van een geleider;
- de doorsnede A van de geleider;
- de specifieke eigenschappen van de geleider, uitgedrukt door de grootheid σ.

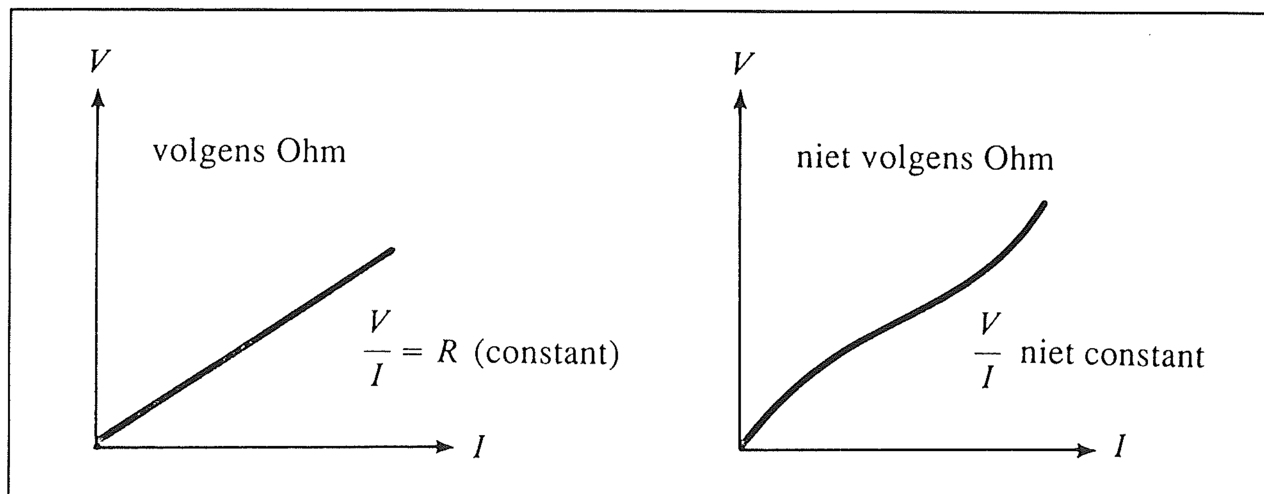
Ohm experimenteerde alleen met geleiders waarbij σ een constante waarde heeft. Men heeft later ontdekt dat er talloze stoffen zijn (halfgeleiders!) waarbij dit niet het geval is. Bovendien zetten materialen uit door warmte, zodat ook de lengte s en de doorsnede A niet per definitie constant zijn. Bovendien heeft men later allerlei ingewikkelde fysische processen ontdekt, die de universele geldigheid van de wet van Ohm nog meer afzwakken. Dat geldt bijvoorbeeld als gewerkt wordt met heel grote stromen en erg hoge spanningen of voor ontladingen door gassen. Hoe dan ook, voor de dagelijkse praktijk in het elektronica-lab voldoet de wet van Ohm echter uitstekend. De grootheid R kan men dan constant veronderstellen, zodat het lineaire en gemakkelijk te berekenen verband tussen stroom en spanning een uitstekend benadering van de realiteit is.

Grafische interpretatie van de wet van Ohm
Uit de formule van de wet van Ohm volgt dat het verband tussen stroom en spanning alleen gegeven wordt door R, een factor die binnen bepaalde grenzen constant kan worden beschouwd. Men kan dus een grafiekje maken die de relatie legt tussen de spanning over een geleider en de stroom doorheen de geleider. Als die grafiek kaarsrecht is, zie de linker grafiek van figuur 3/2.6-14, dan zegt men dat men te maken heeft met een "Ohm's materiaal". Is dit verband niet kaarsrecht, zoals getekend in de rechter grafiek, dan is de factor R dus niet constant en heeft men te maken met een "niet-Ohm's materiaal".

De specifieke weerstand
Naast de door Ohm gedefinieerde specifieke geleiding van geleidende materialen kan men nog een andere grootheid aan deze materialen toekennen: de specifieke weerstand. Als men namelijk draden maakt uit verschillende metalen, die echter allemaal even dik en even lang zijn, stelt men vast dat de weerstand van die draden verschilt. Dat gegeven is verwerkt in de grootheid "specifieke weerstand". Deze grootheid wordt gedefinieerd als de weerstand van een draad, gemaakt uit het beschouwde materiaal, die één meter lang is en één vierkante millimeter doorsnede heeft en dit bij een temperatuur van 20 °C. De specifieke weerstand wordt voorgesteld door de Griekse letter rho, geschreven als ρ en wordt uitgedrukt als:

$$\rho = x\ \Omega\ .\ mm^2\ /\ m$$

De specifieke weerstanden van enige veel gebruikte geleiders:
- zilver: 0,016 $\Omega.mm^2/m$;



Figuur 3/2.6-14: Het verband tussen spanning en stroom voor materialen die voldoen aan de wet van Ohm (links) en materialen die niet aan deze wet voldoen (rechts).

- koper: 0,0178 $\Omega.mm^2/m$;
- aluminium: 0,027 $\Omega.mm^2/m$;
- ijzer: 0,10 $\Omega.mm^2/m$;
- constantaan: 0,50 $\Omega.mm^2/m$;
- koolstof: 30 $\Omega.mm^2/m$.

De temperatuurscoëfficiënt

Reeds eerder werd opgemerkt dat de weerstand van een geleider ook van de temperatuur afhankelijk is. Deze afhankelijk wordt vertaald naar de grootheid "temperatuurscoëfficiënt", die wordt uitgedrukt door de Griekse letter α, "alpha", die wordt uitgesproken als "alfa".
Men kan een eenvoudig wiskundig verband opstellen tussen de weerstand van een geleider bij 0 °C en deze bij een willekeurige temperatuur, als men de waarde van α kent:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t)$$

Hierin is:
- R_0: de weerstand van de geleider bij 0 °C;
- R_t: de weerstand van de geleider bij een temperatuur van t °C;
- α: de temperatuurscoëfficiënt van het materiaal.

Uit de formule volgt dat α een getal is met als eenheid 1/°C.
De temperatuurscoëfficiënt kan zowel positief als negatief zijn. Een positieve waarde betekent dat de weerstand van het materiaal toeneemt als de temperatuur stijgt, een negatieve waarde betekent dat de weerstand daalt als de temperatuur stijgt.
Er zijn ook een paar stoffen bekend die een temperatuurscoëfficiënt van precies 0,0000 hebben. Dat betekent dat de weerstand van die stoffen niet afhankelijk is van de temperatuur, hetgeen iedere elektronicus natuurlijk als muziek in de oren zal klinken. Een dergelijke stof is bijvoorbeeld constantaan, hetgeen de naam natuurlijk reeds doet vermoeden.
De temperatuurscoëfficiënt voor enige vaak toegepaste stoffen:
- aluminium: 0,0039/°C;
- constantaan: 0,0000/°C;
- koolstof: -0,0003/°C;
- koper: 0,0040/°C;
- ijzer: 0,0045/°C;
- zilver: 0,0036/°C.

Vermogen

Inleiding
Elektrische weerstanden worden warm als er een stroom doorheen loopt. Dat is logisch, want de elektronen van de stroom botsen op atomen in de weerstand. Hierdoor worden deze atomen in trilling gebracht waardoor onderlinge wrijvingen ontstaan. Wrijving uit zich steeds onder de vorm van warmte-ontwikkeling. Het verschijnsel dat elektrische stroom warmte opwekt staat bekend als het Joule-effect.

De formule voor elektrisch vermogen
Er bestaat een eenvoudig wiskundig verband dat het vermogen uitdrukt dat door een elektrische stroom in een geleider wordt opgewekt:

P = U . I

Ofwel: het vermogen is gelijk aan het product van de spanning over de geleider en de stroom doorheen de geleider. Dat vermogen wordt natuurlijk in Watt uitgedrukt, afgekort tot W. Een stroom van 1 A, die vloeit als gevolg van een spanning van 1 V, wekt dus een vermogen van 1 W op.
Uit de wet van Ohm volgt echter dat spanning gelijk is aan het product van stroom en weerstand:

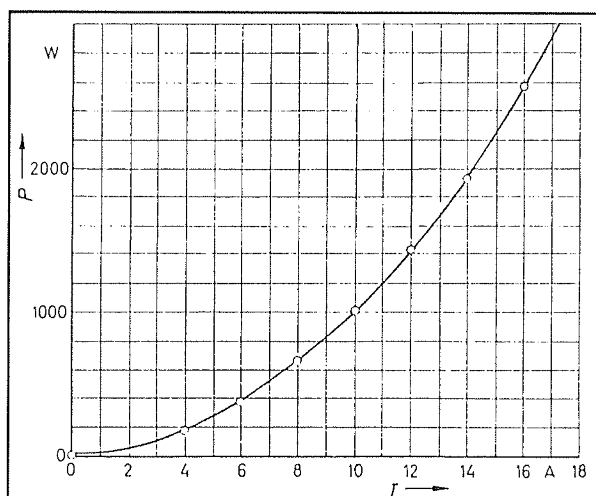
U = I . R

Als men deze uitdrukking invult in de formule van het vermogen ontstaat:

P = I^2 . R

Het vermogen is gelijk aan het kwadraat van de stroom die door een weerstand vloeit, vermenigvuldigd met de weerstand. Beide formules zijn zeer bruikbaar in de elektronica om het vermogen te berekenen dat in een weerstand of een transistor wordt gedissipeerd.

Verband tussen vermogen en stroom
Tussen het opgenomen vermogen en de vloeiende stroom bestaat geen lineair verband, maar een kwadratisch verband. In figuur 3/2.6-15 is dit verband grafisch uitgedrukt voor een bepaalde, constante weerstand.



Figuur 3/2.6-15: Het verband tussen vermogen en stroom, bij gelijkblijvende weerstand.

Elektrische energie
Een begrip dat onlosmakelijk met vermogen vermogen is, is energie. Het vermogen is immers de energie of de arbeid die per tijdseenheid geleverd wordt. Hieruit volgt dat de energie gelijk is aan het vermogen, vermenigvuldigd met de tijd dat dit vermogen gedissipeerd wordt:

W = P . t

Als een stroom door een weerstand vloeit, wordt dus een hoeveelheid energie verbruikt. Het is deze energie die iedereen

aan het Gemeentelijk Energiebedrijf moet betalen. Uit de formule volgt, dat elektrische energie wordt uitgedrukt in Ws, Watt-seconde. Dat is echter een heel onpraktische eenheid, vandaar dat meestal gewerkt wordt met kWh, kilo-Watt-uur. De omrekeningsfactor is natuurlijk gemakkelijk te achterhalen:

1 kWh = 3.600.000 Ws

Voorbeeld
Stel dat een televisietoestel 150 W vermogen verbruikt en dat dit apparaat gemiddeld vier uur per dag in gebruik is. Hoeveel energie wordt er dan per jaar verbruikt?

W = 150 W . 365 dagen . 4 uur
W = 219.000 Wh
W = 219 kWh

Als men de prijs weet die men per kWh moet betalen, kan men berekenen hoeveel die TV per jaar aan energie kost.

De werkingsgraad
Sommige apparaten nemen elektrisch vermogen op, maar geven ook weer nuttig elektrisch vermogen af. Een typisch voorbeeld is een transformator, waar primair een hoeveelheid vermogen wordt ingestopt en secundair een hoeveelheid vermogen wordt afgetapt. Nu zou het prachtig zijn als er even veel vermogen uit een trafo kon gehaald worden als er werd ingestopt. Maar zo zit de wereld niet in elkaar! Er treden steeds verliezen op, in dit geval bijvoorbeeld onder de vorm van warmtevermogen, dat in de windingen en in de kern wordt gedissipeerd. Uit een trafo kan men dus minder elektrisch vermogen halen dan er wordt ingestopt. Dit verschijnsel wordt uitgedrukt onder de vorm van een nieuwe grootheid, de werkingsgraad. Deze grootheid wordt voorgesteld door alweer een griekse letter, deze keer de η, uitgesproken als "eta".
De definitie van η:

$$\eta = P_{uit} / P_{in}$$

De werkingsgraad is dus gelijk aan de verhouding tussen het vermogen dat uit een apparaat wordt gehaald en het vermogen dat men er heeft ingestopt. Uit de aard der zaak is η altijd een getal dat kleiner is dan een. Zou η groter zijn dan een, dan zou men een soort perpetuüm mobile hebben gemaakt, een apparaat dat meer vermogen levert dan men er in stopt!
Normale voedingstransformatoren hebben een werkingsgraad van rond de 0,90. Gloeilampen zijn wat dat betreft verkwistend, want de werkingsgraad ligt rond de 0,015!

3/2.7

Weerstanden en condensatoren in de praktijk

Inleiding

Basisonderdelen van de elektronica

Weerstanden en condensatoren vormen zonder meer de basisonderdelen van de elektronica. Weliswaar is het zo dat dioden, transistoren en IC's de functie van een schakeling bepalen, maar het zijn de weerstanden en condensatoren die de karakteristieken van de schakeling vast leggen. Als een monostabiele multivibrator een uitgangspuls levert met een breedte van 0,25 µs, dan zorgt het IC ervoor dat de schakeling die puls genereert. Maar men kan er zeker van zijn dat de preciese pulsbreedte van 0,25 µs wordt vastgelegd door een eenvoudig weerstandje en een al even eenvoudige condensator.

RC-kringen

RC-kringen, combinatieschakelingen van weerstanden en condensatoren, zijn dus zeer belangrijk in de elektronica. In dit hoofdstuk worden deze kringen besproken en worden enige eenvoudige formules afgeleid, die de werking van deze kringen bepalen. Aan de orde komen verder enige wetten, genoemd naar beroemde wetenschappers, zoals:

- de wetten van Kirchhoff.
- de wet van Wheatstone;
- het theorema van Thévenin;
- het theorema van Norton.

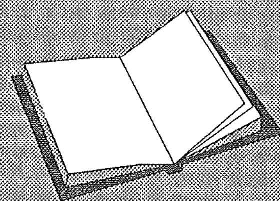
Met deze wetten kan men passieve kringen, schakelingen die dus alleen bestaan uit spannings- en/of stroombronnen en weerstanden, volledig doorgronden. Men kan alle gelijkstromen, gelijkspanningen en weerstanden, die in de kring aanwezig zijn, op een eenvoudige manier berekenen.

Schakelingen met weerstanden

De wet van Ohm als basis

De in het vorige hoofdstuk besproken wet van Ohm is de basis, waarmee men alle mogelijke kringen die alleen uit spanningsbronnen en weerstanden bestaan, te lijf moet gaan. Vandaar nog even in het kort de betekenis van deze wet. De wet van Ohm stelt dat er een bepaalde evenredig-

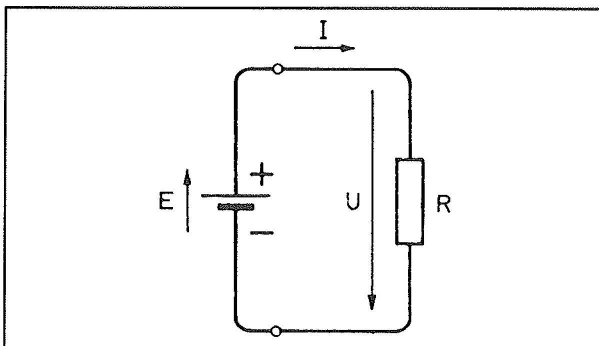
LEES OOK:
Hoofdstuk 3/2.5
Hoofdstuk 3/2.6
Hoofdstuk 3/4.1
Hoofdstuk 3/4.2
Hoofdstuk 3/4.6
Hoofdstuk 3/11.1



heid bestaat tussen de spanning over een weerstand en de stroom die er doorheen vloeit. Die evenredigheid noemt men de waarde van de weerstand R en wordt uitgedrukt in Ω. In formulevorm kan de wet van Ohm uitgedrukt worden als:

$$R = \frac{U}{I}$$

Deze wet werd door Ohm experimenteel vastgesteld, maar kan ook door zuiver redeneren achterhaald worden. Daarvoor wordt gebruik gemaakt van het schemaatje dat in figuur 3/2.7-1 getekend is.



Figuur 3/2.7-1: Aan de hand van dit schemaatje kan de experimentele wet van Ohm ook beredeneerd worden.

Als een weerstand R wordt aangesloten op een spanningsbron met een elektromotorische kracht E, dan ontstaat er over de weerstand een spanningsval die gelijk is aan U. Als gevolg hiervan gaat er door de weerstand een stroom I vloeien. Als de elektromotorische kracht van de spanningsbron groter wordt, dan neemt de kracht op de vrije elektronen toe. Uit de algemene wetten van de mechanica volgt dan dat de snelheid van de elektronen groter wordt. Er vloeien dus per seconde meer elektronen door de kring, hetgeen betekent dat de stroom stijgt. ***De stroom door de kring is dus evenredig met het spanningsverschil in de keten.***

Neemt echter de weerstand toe, dan worden de elektronen geremd. Hun snelheid neemt af en de stroom zal dalen. ***De stroom door de kring is dus omgekeerd evenredig met de weerstand.*** Beide cursief gedrukte conclusies kunnen wiskundig uitgedrukt worden door:

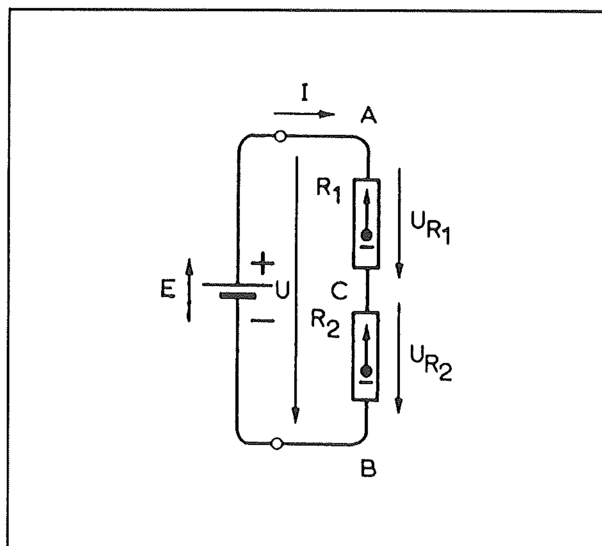
$$I = \frac{U}{R}$$

of, door I en R van plaats te verwisselen:

$$R = \frac{U}{I}$$

Weerstanden in serieschakeling

Bij de serieschakeling van twee weerstanden, zoals getekend in figuur 3/2.7-2, is één ding onmiddellijk duidelijk. Er vloeit maar één stroom I door de keten, zodat beide weerstanden door dezelfde stroom doorlopen worden.



Figuur 3/2.7-2: Serieschakeling van weerstanden.

Op iedere weerstand kan men de wet van Ohm toepassen:

$$U_R = I \cdot R.$$

De totale spanning over de serieschakeling is gelijk aan de som van de potentiaal-

2.7 Weerstanden en condensatoren in de praktijk

verschillen over iedere afzonderlijke weerstand:

$U_{tot} = U_{R1} + U_{R2}$

Of:

$U_{tot} = (I \cdot R_1) + (I \cdot R_2)$

$U_{tot} = I \cdot (R_1 + R_2)$

Maar anderzijds is:

$U_{tot} = I \cdot R_{tot}$

Uit beide laatste formules kan men dus afleiden:

$R_{tot} = R_1 + R_2$

Bij de serieschakeling van weerstanden is de totale weerstand gelijk aan de som van de in serie geschakelde weerstanden.

Spanningsdeling

Een serieschakeling van weerstanden wordt in de elektronica vaak toegepast om spanningsdelers te maken. Stel, dat men een voedingsspanning van 10 V ter beschikking heeft, maar op een bepaald punt behoefte heeft aan een spanning van 4 V. Uit de 10 V kan gemakkelijk een spanning van 4 V worden afgeleid door twee weerstanden in serie te schakelen. Door een bepaalde weerstandsverhouding te kiezen zal op het knooppunt tussen beide weerstanden de gewenste spanning van 4 V ontstaan.

Hoe een dergelijke spanningsdeler berekend moet worden volgt weer uit figuur 3/2.7-2 en de wet van Ohm. De spanning over de weerstand R_2 is gelijk aan:

$U_{R2} = I \cdot R_2$

De stroom door de kring wordt bepaald door:

$$I = \frac{U}{R_{tot}}$$

Als men deze waarde in de vorige formule invult, ontstaat:

$$U_{R2} = U \cdot \frac{R_2}{R_{tot}}$$

Hieruit volgt weer:

$U_{R2} \cdot R_{tot} = U \cdot R2$

Of:

$$R_2 = \frac{U_{R2} \cdot R_{tot}}{U}$$

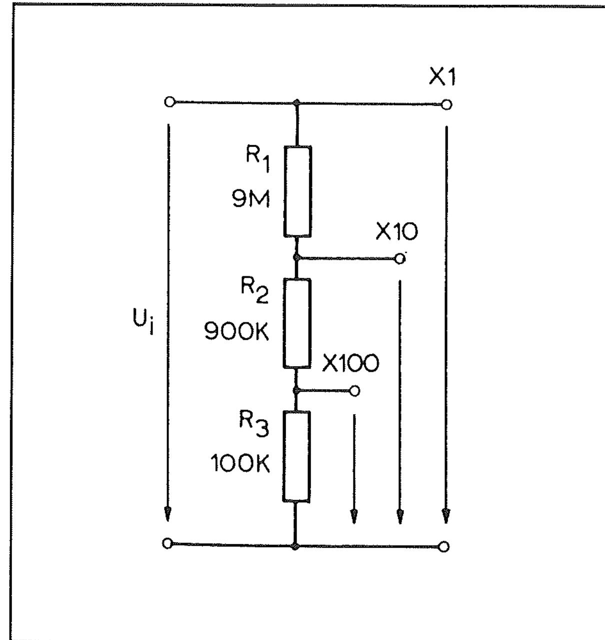
De waarden van U en U_{R2} zijn bekend, namelijk 10 V en 4 V. Het volstaat nu een waarde voor de totale weerstand R_{tot} te kiezen, bijvoorbeeld 10 kΩ, om onmiddellijk de waarde van R2 te kunnen berekenen. In dit geval is deze weerstand gelijk aan 4 kΩ, zodat de waarden van R1 gelijk moet zijn aan 6 kΩ.

Een praktijkvoorbeeld van spanningsdeling

Dergelijke resistieve spanningsdelers worden, zoals reeds geschreven, vaak toegepast in de elektronica. Als men bijvoorbeeld een digitale voltmeter met een eigen bereik van 1 V volle schaal geschikt wil maken voor het meten van hogere spanningen, moet men er een serieschakeling van weerstanden voorschakelen. In figuur 3/2.7-3 is een dergelijke spanningsdeler getekend. Door de selectie van de weerstandswaarden op 100 kΩ, 900 kΩ en 9 MΩ ontstaan op de twee knooppunten spanningen die gelijk zijn aan een tiende en een honderdste van de ingangsspanning. Als men dus een spanning van 95 V over de serieschakeling aanlegt, zullen op de twee knooppunten spanningen van 9,5 V en 0,95 V ontstaan. Door de ingang van de digitale meter te verbinden met het knooppunt tussen R2 en R3 zal de ingangsspanning van 95 V gemeten worden als 0,95 V. Het volstaat nu met een tweede schakelaarsectie de decimale punt van de uitlezing om te schakelen naar de juiste positie tussen de drie display's.

In figuur 3/2.7-4 is een praktische schakeling getekend, zoals men die bij alle digitale universeelmeters kan aantreffen. Het

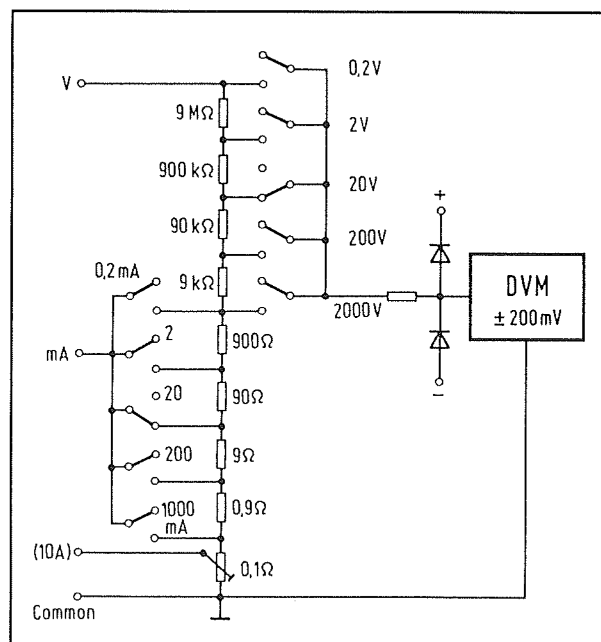
enige verschil met het schema van figuur 3/2.7-3 is dat een deel van de serieschakeling wordt gebruikt voor het meten van stromen.
Ook hier is het de wet van Ohm die de werking van de stroommeter bepaalt. Als men de stroombereik omschakelaar in de stand 2 mA zet, dan zal de stroom die aan de mA-ingang (onder) wordt aangeboden door de serieschakeling van de weerstanden van 90 Ω, 9 Ω, 0,9 Ω en 0,1 Ω vloeien. De vervangingswaarde van deze serieschakeling is 100 Ω. Een stroom van 1,25 mA wekt over deze weerstand een spanningsval van 125 mV op. Deze spanning gaat via een van de standen van de spanningsbereik schakelaar naar de ingang van het meetmodule. De te meten stroom is dus omgezet in een spanning, die numeriek gelijk is aan de waarde van de stroom.



Figuur 3/2.7-3: Een resistieve spanningsdeler wordt bijvoorbeeld gebruikt om het meetbereik van een digitale voltmeter uit te breiden.

De potentiometer

De potentiometer is de ultieme vorm van een spanningsdeler. Zoals uit figuur 3/2.7-5 blijkt, is een potentiometer niets anders dan een serieschakeling van twee weerstanden, waarbij de loper is verbonden met het knooppunt van beide weerstanden. Door het verdraaien van de loper wordt de verhouding tussen beide deelweerstanden continu veranderd. Een potentiometer is dus een spanningsdeler, waarbij de deelverhouding continu ingesteld kan worden tussen 1 en 0.

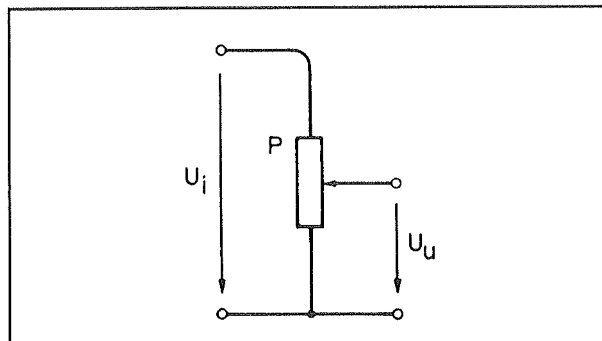


Figuur 3/2.7-4: Een praktische toepassing van de serieschakeling van weerstanden.

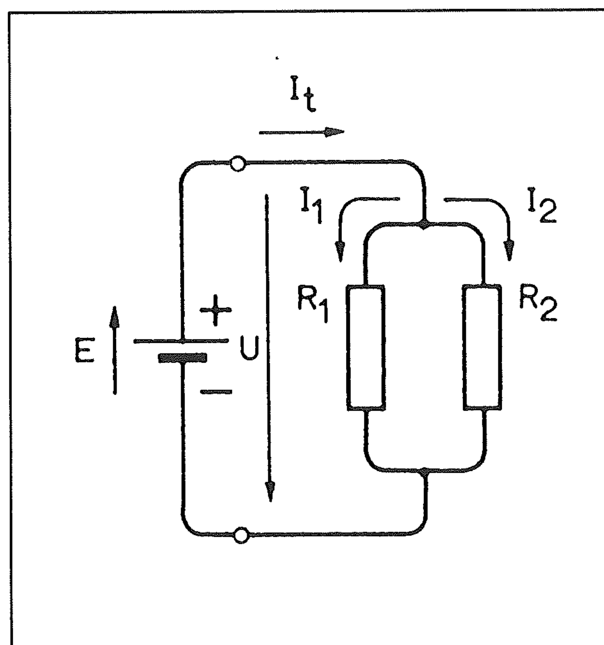
Weerstanden in parallelschakeling

Weerstanden staan parallel, als zij op dezelfde spanningsbron zijn aangesloten. In figuur 3/2.7-6 is de parallelschakeling van twee weerstanden R1 en R2 getekend. Ook nu moet de vraag beantwoord worden hoe groot de totale vervangingsweerstand Rtot is.

2.7 Weerstanden en condensatoren in de praktijk



Figuur 3/2.7-5: Een potentiometer is een serieschakeling van twee weerstanden, waarvan de verhouding continu ingesteld kan worden.



Figuur 3/2.7-6: De parallelschakeling van twee weerstanden.

Het zal duidelijk zijn dat de totale stroom I_t gelijk is aan de som van de stromen die door de twee weerstanden vloeien:

$$I_t = I_1 + I_2$$

Men kan de stromen uitdrukken door de wet van Ohm toe te passen:

$$\frac{U}{R_{tot}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

Als men linker en rechter uitdrukking deelt door U ontstaat:

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Dit is de algemene uitdrukking waaraan de parallelschakeling van weerstanden voldoet. Als men n weerstanden parallel schakelt is de totale vervangingsweerstand gelijk aan:

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots + \frac{1}{R_n}$$

In het geval van twee parallel geschakelde weerstanden kan men deze formule echter iets handelbaarder schrijven.
Wie zich nog uit zijn schooltijd herinnert hoe men twee breuken met ongelijke noemer kan optellen, zal tot de conclusie komen dat:

$$R_{tot} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Deze zeer praktische formule kan in woorden kort en krachtig als volgt worden uitgedrukt. ***De vervangingsweerstand van twee parallel geschakelde weerstanden is gelijk aan hun product gedeeld door hun som.***

Stroomdeling

Het bespreken van de serieschakeling van weerstanden leidde tot het begrip spanningsdeling. Op dezelfde manier leidt de parallelschakeling tot het begrip stroomdeling. Zoals reeds geschreven deelt de totale stroom I_t zich bij een parallelschakeling in twee deelstromen I_1 en I_2. Het is, alweer met de wet van Ohm, mogelijk om aan te tonen dat de stromen zich omgekeerd verhouden als de weerstanden. Dus:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Door de grootste weerstand vloeit de kleinste stroom, door de kleinste weerstand de grootste. Als R1 drie keer groter

2.7 Weerstanden en condensatoren in de praktijk

is dan R2, dan zal I_1 drie keer kleiner zijn dan I_2. Door alweer de wet van Ohm toe te passen en enige berekeningetjes te maken kan men aantonen dat:

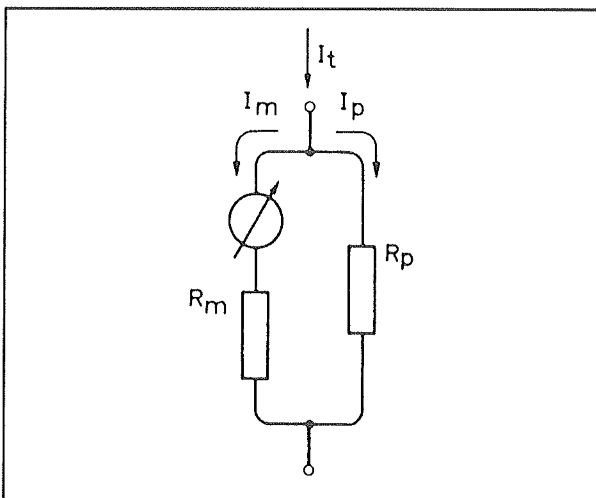
$$I_1 = I_t \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

en:

$$I_2 = I_t \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Een praktijkvoorbeeld van stroomdeling

Deze formules komen in de praktijk van pas om bijvoorbeeld het volgende probleem op te lossen. Stel dat men een gestabiliseerde 12 V voeding bouwt die een uitgangsstroom van 1 A kan leveren. Nu wil men deze stroom meten. Men kan natuurlijk een draaispoelmetertje kopen met een bereik van 1 A. Maar toevallig heeft men in de rommelkist nog een oud metertje liggen met een bereik van 1 mA. Dank zij de formules van de stroomdeling kan men deze meter toch gebruiken om de gewenste stroom van 1 A te meten. Aan de hand van het schema van figuur 3/2.7-7 wordt een en ander duidelijk.



Figuur 3/2.7-7: Een praktisch voorbeeld van de formules van de stroomdeling.

De meter heeft uiteraard een bepaalde inwendige weerstand, voorgesteld door R_m. Als het goed is, staat de waarde van deze weerstand op de achterzijde van de draaispoelmeter. De totale stroom I_t van 1 A zal zich splitsen in twee deelstromen. De stroom I_m door de meter moet 1 mA groot zijn, zodat de stroom door de parallelweerstand R_p gelijk moet zijn aan 999 mA. Men kent nu drie grootheden uit de uitdrukking:

$$\frac{I_m}{I_P} = \frac{R_p}{R_m}$$

zodat men zonder enige moeite de enige ontbrekende grootheid R_p kan berekenen. Een dergelijke weerstand, die parallel over een draaispoelmeter wordt geschakeld om het stroombereik te vergroten noemt men een *"shunt-weerstand"*.

De wetten van Kirchhoff

De Duitse natuurkundige en hoogleraar Robert Gustav Kirchhoff paste in de jaren 1845 en 1846 de wet van Ohm toe op ingewikkelde netwerken van spanningsbronnen en weerstanden. Hij ontdekte twee wetmatigheden die als volgt kunnen worden samengevat.

- Eerste wet van Kirchhoff (figuur 3/2.7-8)
  In ieder knooppunt van een netwerk is de hoeveelheid elektriciteit die in één seconde naar dit punt toevloeit exact gelijk aan de hoeveelheid elektriciteit die in dezelfde tijd van dat punt wegstroomt. Hoeveelheid elektriciteit per seconde kan zonder problemen vertaald worden naar grootte van stromen. De eerste wet van Kirchhoff stelt dus dat in ieder punt de som van de naar dat punt toevloeiende stromen gelijk is aan de som van de stromen die van dat punt wegvloeien. Vertaald naar het voor-

2.7 Weerstanden en condensatoren in de praktijk

beeld van figuur 3/2.7-8 betekent dit dus dat:

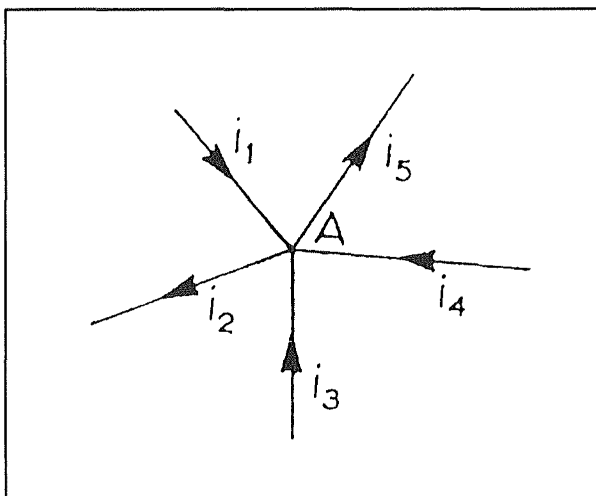
$I_1 + I_3 + I_4 = I_2 + I_5$

- Tweede wet van Kirchhoff (figuur 3/2.7-9)

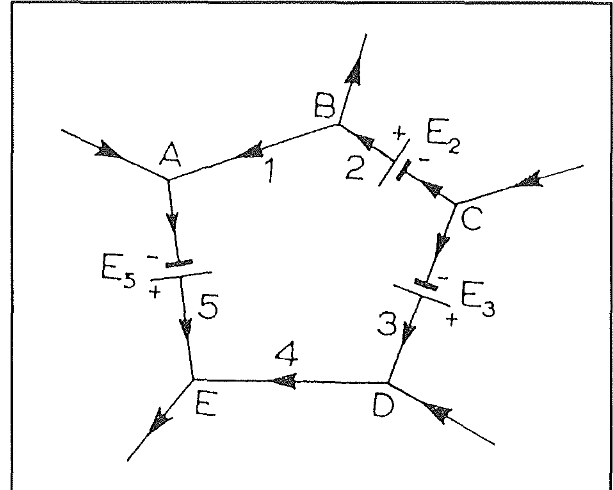
In een gesloten lus van een netwerk is de algebraïsche som van alle aanwezige emk's en spanningsvallen gelijk aan nul. Dat "algebraïsch" wil zeggen dat men aan de emk's en spanningsvallen een plus- of minteken moet toekennen. Als men de lus bijvoorbeeld doorloopt in uurwijzerzin moet men een emk of spanningsval positief rekenen als men eerst de negatieve en nadien de positieve pool tegenkomt. Andersom, als men eerst de positieve pool en nadien de negatieve pool ontmoet, moet men de emk of spanningsval negatief rekenen. In het in figuur 3/2.7-9 getekende voorbeeld betekent dit dus:

$-E_5 - E_2 + E_3 = 0$

In dit voorbeeld zijn voor de eenvoud alleen drie bronnen met hun emk's opgenomen. Maar als er in de gesloten lus ook weerstanden aanwezig zijn, dan moet men de spanningsvallen daarover ook in de optelling opnemen.



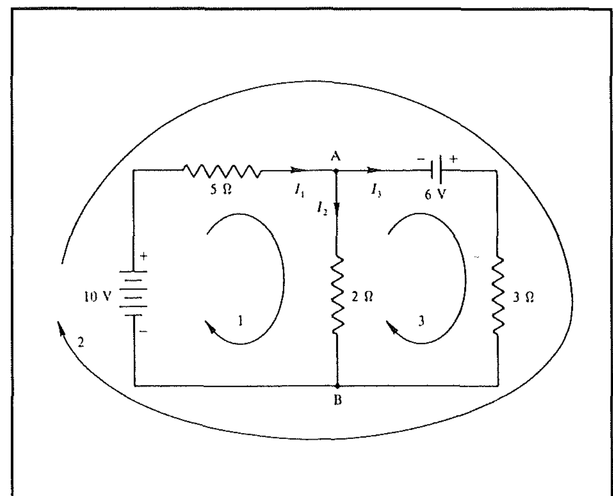
Figuur 3/2.7-8: Toelichting bij de eerste wet van Kirchhoff.



Figuur 3/2.7-9: Toelichting bij de tweede wet van Kirchhoff.

Een rekenvoorbeeld van de wetten van Kirchhoff

De twee wetten van Kirchhoff geven de elektronicus een handige methode om stromen en spanningen in ingewikkelde netwerken te berekenen. Als voorbeeld wordt het netwerkje van figuur 3/2.7-10 behandeld. De vraag is hoe groot de stromen zijn die door de drie weerstanden vloeien.



Figuur 3/2.7-10: Met de wetten van Kirchhoff kan men alle stromen in dit netwerkje berekenen.

2.7 Weerstanden en condensatoren in de praktijk

In het netwerkje kunnen drie gesloten lussen herkend worden, namelijk 1, 2 en 3. Verder kan men een knooppunt A onderscheiden, waar drie stromen tesamen komen. Aan die drie stromen worden willekeurige richtingen toegekend, bijvoorbeeld I1 naar punt A toe en I2 en I3 van het punt af. Als uit de berekening een negatieve waarde van een stroom volgt, weet men dat de werkelijke richting omgekeerd is aan de gekozen. In punt A kan men de eerste wet toepassen, zodat:
$\mathbf{I_1 = I_2 + I_3}$ *(1)*
Als men de tweede wet toepast op de gesloten lus 1 ontstaat:
$\mathbf{10 - 5.I_1 - 2.I_2 = 0}$ *(2)*
Dezelfde wet toegepast op de buitenste lus 2 geeft:
$\mathbf{10 - 5.I_1 + 6 - 3.I_3 = 0}$ *(3)*
Er ontstaat een stelsel van drie vergelijkingen met drie onbekenden. Met wat eenvoudige wiskunde kan men dit stelsel oplossen. Het volstaat in de tweede vergelijking I_2 uit te drukken als functie van I_1 en in de derde vergelijking I_3 uit te drukken in functie van I_1. Nadien kan men deze waarden van I_2 en I_3 weer invullen in de eerste vergelijking, zodat deze nog maar één onbekende I_1 bevat. Hieruit volgt dat $I_1 = 2$ A.
Hoewel dit vrij eenvoudige algebra is, kan het natuurlijk zo zijn dat een aantal lezers/essen dit toch niet zélf voor elkaar krijgen. Daarom is in het kader van figuur 3/2.7-11 de berekening van de waarde van I_1 stap voor stap uitgevoerd.

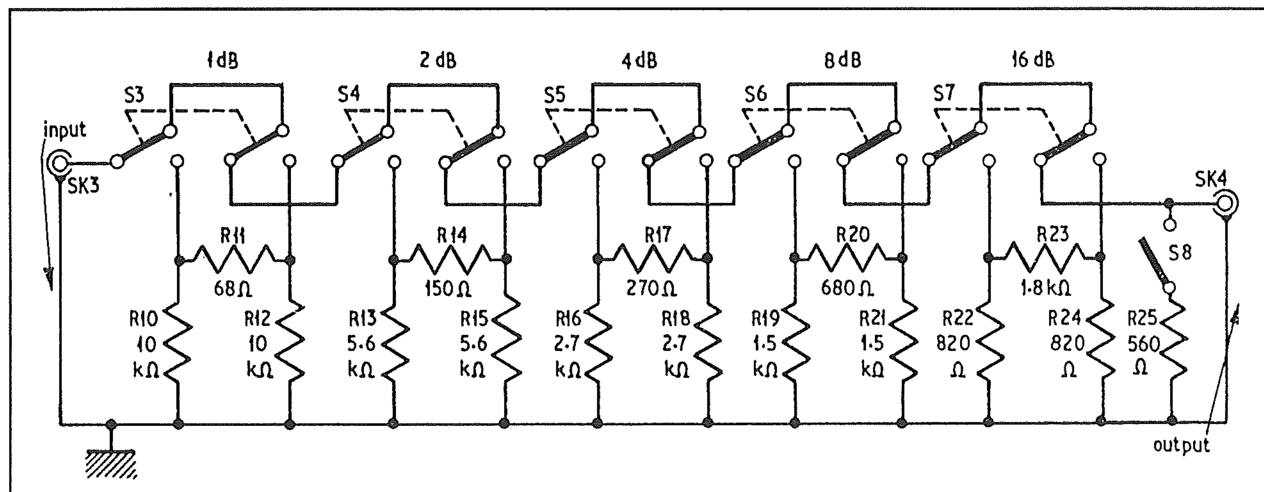
Uit (2) volgt:
$2.I2 = 10 - 5.I1$
of:
$$I2 = \frac{10 - 5.I1}{2} \quad (4)$$
Uit (3) volgt:
$3.I3 = 10 - 5.I1 + 6 = 16 - 5.I1$
of:
$$I3 = \frac{16 - 5.I1}{3} \quad (5)$$
Invullen van (4) en (5) in (1) geeft:
$$I1 = \frac{10 - 5.I1}{2} + \frac{16 - 5.I1}{3}$$
Op gelijke noemer brengen door de eerste breuk te vermenigvuldigen met drie
en de tweede met twee:
$$I1 = \frac{30 - 15.I1}{6} + \frac{32 - 10.I1}{6}$$
Nu er een gelijke noemer is kan men optellen:
$$I1 = \frac{30 - 15.I1 + 32 - 10.I1}{6}$$
Links en rechts vermenigvuldigen met 6:
$6.I1 = 30 - 15.I1 + 32 - 10.I1 = 62 - 25.I1$
Alle I1-termen naar links zetten:
$6.I1 + 25.I1 = 62$
Optellen:
$31.I1 = 62$
Delen door 31:
$I1 = 2$

Figuur 3/2.7-11: De berekening van de waarde van I1 stap na stap uitgewerkt.

Enige rekenregeltjes voor het oplossen van dergelijke vergelijkingen op een rijtje gezet:
- Als men een term van links naar rechts gooit of andersom, verandert het teken. Dus A + B = C + D kan ook geschreven worden als A + B - C = D.
- Aan een vergelijking verandert niets als men links en rechts met hetzelfde getal vermenigvuldigt of door hetzelfde getal deelt. Dus de vergelijking A = 5.B is hetzelfde als 5.A = 25.B.
- In een breuk kan men teller en noemer met hetzelfde getal vermenigvuldigen. De breuk $^{A}/_{2.B}$ is dus gelijk aan de breuk $^{2.A}/_{4.B}$.

Aan de hand van deze drie simpele rekenregels moet men het kadertje van figuur 3/2.7-11 kunnen begrijpen!

2.7 Weerstanden en condensatoren in de praktijk



Figuur 3/2.7-12: Dergelijke verzwakkernetwerken kunnen volledig berekend worden als men de wetten van Kirchhoff onder de knie heeft.

Door nu de berekende waarde van I_1 in te vullen in de tweede en derde vergelijking kan men de waarden van I_2 en I_3 berekenen, met respectievelijk 0 A en 2 A. Ter bevestiging kan men de eerste wet van Kirchhoff in punt A nog even controleren:

2 A = 0 A + 2 A

Besluit

De twee wetten van Kirchhoff hebben een groot praktisch nut. Aan de hand van deze wetten kan men ingewikkelde verzwakkernetwerken, zoals dubbel-T of dubbel-π netwerken, vrij eenvoudig berekenen. In figuur 3/2.7-12 is als voorbeeld een verzwakker getekend, die samengesteld is uit vijf enkelvoudige π-netwerken. De bedoeling is dat ieder netwerk het ingangssignaal met een bepaalde dB-factor verzwakt. Dergelijke netwerken kunnen berekend worden als men de twee wetten van Kirchhoff volledig begrijpt en de opgesomde rekenregels onder de knie heeft. De twee wetten van Kirchhoff zijn gebaseerd op twee fundamentele wetten van de mechanica: de wet van behoud van lading en de wet van behoud van energie.

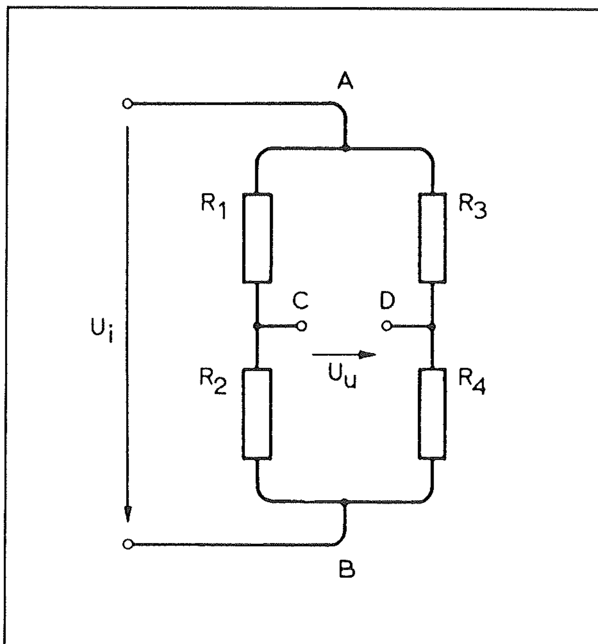
De wet van Wheatstone

Wheatstone wordt algemeen erkend als de uitvinder van de brugschakeling, hoewel zuiver historisch bekeken deze eer eerder toekomt aan Samuel Christie.
Hoe dan ook, de schakeling die in figuur 3/2.7-13 getekend is, staat algemeen bekend als "brug van Wheatstone". Deze brug bestaat uit vier weerstanden, die een gecombineerde serie/parallel kring vormen die is aangesloten op een spanningsbron U_i. De wet van Wheatstone zegt nu dat de spanning tussen de knooppunten C en D gelijk is aan nul, als er aan de volgende gelijkheid wordt voldaan:

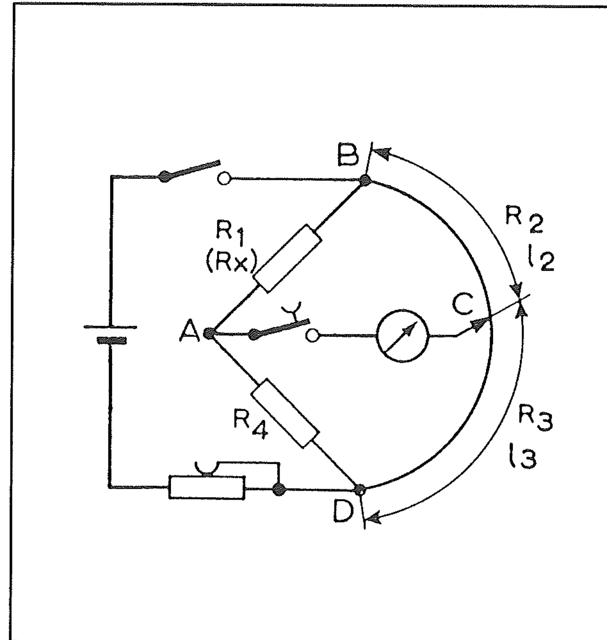
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Men zegt dat de brug in evenwicht is.
Deze schakeling wordt vaak toegepast in de elektronica. Een van de voor de hand liggende toepassingen is het meten van weerstanden. Als men de onbekende weerstand R_x in een van de vier takken van de brug opneemt en de verhouding van de weerstanden R_2 en R_3 in de andere tak regelbaar maakt, zie figuur 3/2.7-14, dan kan men de waarde van de onbekende

weerstand heel nauwkeurig bepalen. Het volstaat een zeer gevoelige stroommeter tussen de diagonaal A/C van de brug op te nemen en de verhouding tussen R_2 en R_3 zo te regelen tot er geen stroom door de meter vloeit. De brug is dan in evenwicht. Uit de bekende waarden van de vaste weerstand R_4 en de instelbare weerstanden R_2 en R_3 kan men met de wet van Wheatstone onmiddellijk de waarde van de onbekende weerstand R_x berekenen.



Figuur 3/2.7-13: De brug van Wheatstone.



Figuur 3/2.7-14: Een praktische toepassing van de wet van Wheatstone: het nauwkeurig meten van een onbekende weerstand R_x.

Het begrip inwendige weerstand

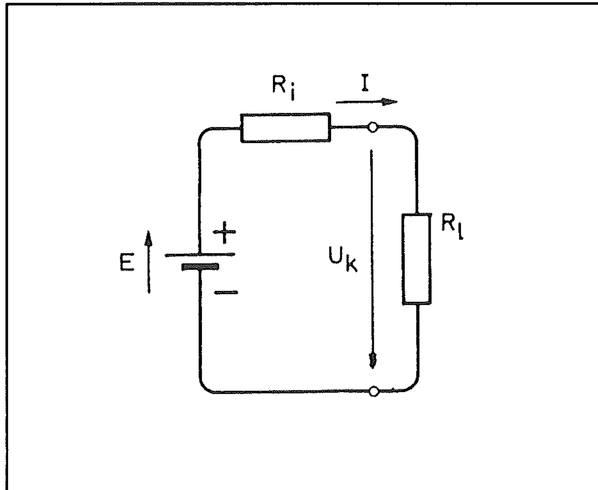
Een spanningsbron wordt niet alleen gekenmerkt door zijn emk, maar ook door zijn inwendige weerstand R_i. Het gevolg hiervan is dat men niet zonder meer kan stellen dat de bron een spanning levert die gelijk is aan zijn emk. Men moet twee spanningsdefinities invoeren, namelijk een in een toestand waarin de bron niet belast wordt en een in een toestand waarin de bron wél belast wordt. Het verschil valt te verklaren uit het schema van figuur 3/2.7-15.

De spanningsbron wordt voorgesteld door de serieschakeling van een ideale bron E en de inwendige weerstand R_i. Als de bron niet belast is zal er geen stroom doorheen vloeien, met als gevolg dat er geen spanning over de inwendige weerstand valt. De uitgangsspanning van de bron U_k is dan gelijk aan E, de emk van de bron. Als de bron echter belast wordt door een weerstand R_l, dan ontstaat er een serieschakeling van R_i en R_l. Het gevolg is dat er een stroom doorheen gaat vloeien die over de inwendige weerstand een bepaalde spanning opwekt. De uitgangsspanning U_k is dan niet meer gelijk aan de waarde van E, maar zal lager zijn. De waarde van U_k wordt de ***"klemspanning"*** van de bron genoemd, omdat dit de spanning is die men in de praktijk tussen de klemmen van de bron kan meten.

De klemspanning is gelijk aan:

$$\mathbf{U_k = E - I.R_i}$$

2.7 Weerstanden en condensatoren in de praktijk



Figuur 3/2.7-15: Het begrip "inwendige weerstand van een spanningsbron" grafisch toegelicht.

Aanpassing

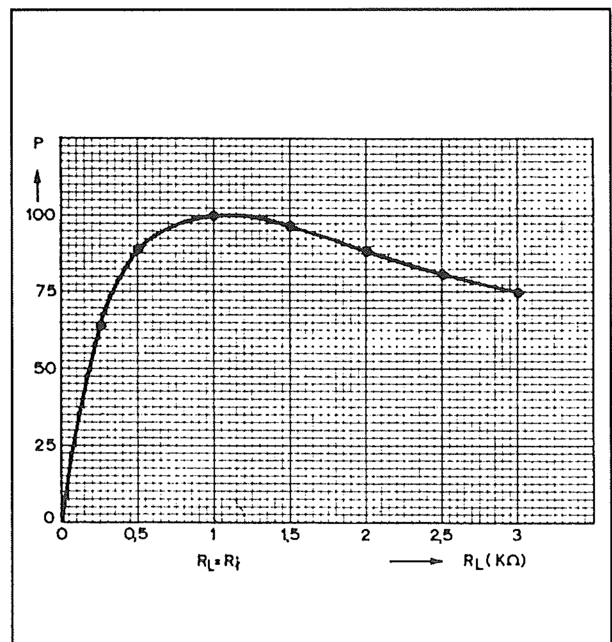
Een belangrijk gevolg van de aanwezigheid van de inwendige weerstand is dat het vermogen dat uit een spanningsbron kan worden gehaald afhankelijk is van de verhouding tussen de inwendige weerstand en de belastingsweerstand. Dat is een belangrijk gegeven, omdat het er in de praktijk vaak op aan komt zoveel mogelijk vermogen uit een bron te halen. Denk bijvoorbeeld aan een laagfrequent eindversterker. Zo'n schakeling kan opgevat worden als een spanningsbron, die vermogen aan de belasting (de luidspreker) levert. Natuurlijk heeft die eindversterker een bepaalde inwendige weerstand. Het komt er nu op aan de weerstand van de luidspreker zo te kiezen, dat de versterker zo veel mogelijk vermogen aan de luidspreker levert. Men noemt dat ***"het aanpassen van de belasting aan de bron"***. Aan de hand van figuur 3/2.7-15 kan men inzien dat er twee waarden van de belasting zijn, waarbij de bron géén vermogen levert. Zoals bekend wordt het elektrisch vermogen dat in een weerstand wordt gedissipeerd gegeven door de formule:

$$P = I^2 . R$$

of, als men R vervangt door de verhouding tussen spanning en stroom:

$$P = I . U$$

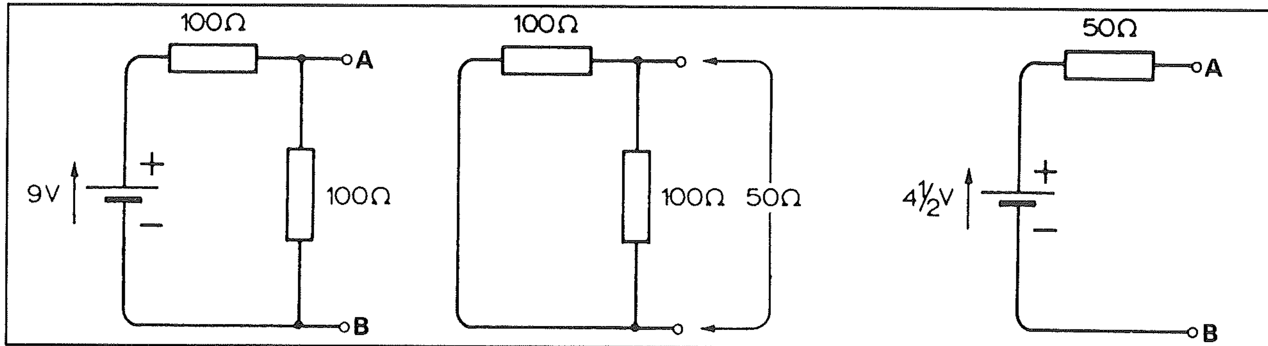
Als de belastingsweerstand 0 is, dan is de spanning over die weerstand ook 0, met als logisch gevolg dat P = 0. Als de belastingsweerstand oneindig hoog is, dan vloeit er geen stroom doorheen, alweer met als gevolg dat het vermogen 0 is. Tussen die twee nul-waarden zal het van bron naar belasting overgedragen vermogen een verloop hebben als geschetst in figuur 3/2.7-16.



Figuur 3/2.7-16: Het verband tussen waarde van de belastingsweerstand en de grootte van het tussen bron en belasting overgedragen vermogen.

Hieruit blijkt dat het maximale vermogen van bron naar belasting wordt overgedragen als de belastingsweerstand precies gelijk is aan de inwendige weerstand. Een zeer belangrijke wet!

2.7 Weerstanden en condensatoren in de praktijk



Figuur 3/2.7-17: Een eenvoudig voorbeeld waarmee het theorema van Thévenin wordt toegelicht.

Dank zij deze wet kan men schakelingen die vermogen moeten leveren optimaliseren.

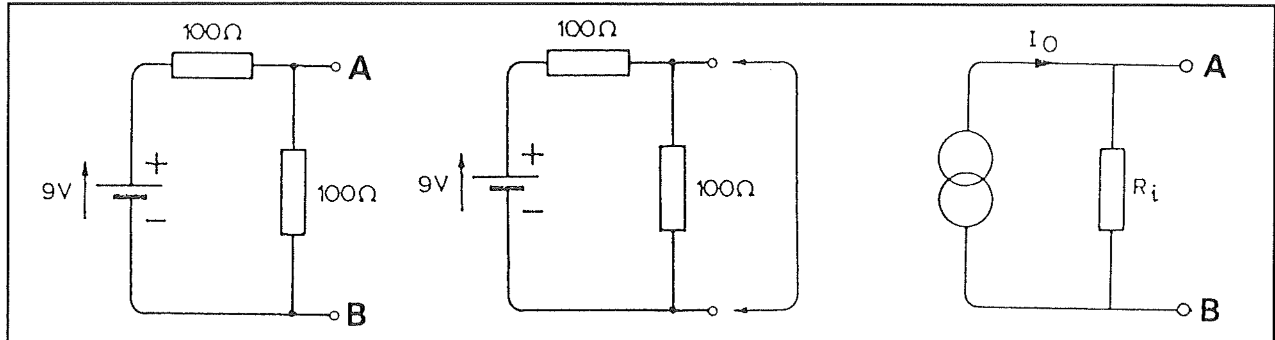
Meten van de inwendige weerstand

Natuurlijk komt het er op aan de inwendige weerstand van een spanningsbron te kennen. Die kan eenvoudig gemeten worden aan de hand van het schema van figuur 3/2.7-15. Eerst meet men de klemspanning zonder belastingsweerstand. Nadien sluit men een bekende weerstand aan over de bron en meet weer de uitgangsspanning. Die zal lager zijn, dat is een zaak die duidelijk is. Men kent nu de klemspanning en de waarde van de belastingsweerstand, dus men kan de stroom berekenen met de wet van Ohm. Uit het verschil tussen beide metingen weet men ook de spanningsval over de inwendige weerstand R_i. Men weet de stroom, uit de kennis van spanningsval en stroom kan men de waarde van R_i berekenen.
Een voorbeeldje. Stel dat de onbelaste spanning gelijk is aan 10 V. Als men de bron belast met een weerstand van 1 kΩ zakt de klemspanning tot 9 V. Op dat moment vloeit er een stroom van 9 V gedeeld door 1 kΩ is gelijk aan 9 mA door de kring. Deze stroom wekt over de inwendige weerstand een spanning op van 10 V minus 9 V is gelijk aan 1 V. De inwendige weerstand is dus 1 V gedeeld door 9 mA is gelijk aan 111,11 Ω.

Het theorema van Thévenin

Het theorema van Thévenin geeft een handige methode om netwerken, die bestaan uit spanningsbronnen en weerstanden, te vereenvoudigen. Thévenin stelt dat iedere gesloten lus in een netwerk vervangen kan worden door de serieschakeling van een zuivere emk-spanningsbron en een serieweerstand. Die eenvoudige schakeling zal zich dan, naar de buitenwereld toe, net zo gedragen als de oorspronkelijke gesloten lus. In de elektronica spreekt men van ***"het opstellen van een equivalente schakeling"***, een belangrijke methode om ingewikkelde schakelingen te vereenvoudigen tot zij zeer inzichtelijk zijn geworden. In figuur 3/2.7-17 wordt dit theorema op een eenvoudig voorbeeldje toegepast.
In deze figuur is uiterst links een gesloten lus getekend, die deel uitmaakt van een ingewikkeld netwerk. Die gesloten lus is via de punten A en B met de rest van dat netwerk verbonden. Uiterst rechts is getekend hoe Thévenin deze gesloten lus vereenvoudigt tot een emk-bron en een serieweerstand.
Het omzetten gaat in twee fasen, waarbij men meestal de wetten van Kirchhoff moet toepassen.

2.7 Weerstanden en condensatoren in de praktijk



Figuur 3/2.7-18: Het omzetten van een gesloten lus in een Norton-equivalent.

- Fase 1
  Bereken de spanning die tussen de punten A en B aanwezig is, zonder dat de lus door iets anders belast wordt. In het eenvoudige voorbeeld blijkt onmiddellijk dat de spanning tussen de punten A en B gelijk is aan 4,5 V.
- Fase 2
  Vervang alle spanningsbronnen in de gesloten lus door een kortsluiting en bereken dan de weerstand die tussen de punten A en B gemeten kan worden. In dit simpele geval is het overduidelijk dat die weerstand gelijk is aan 50 Ω, want als men de bron kortsluit staan de twee weerstanden van 100 Ω parallel geschakeld.

De gesloten lus kan nu vervangen worden door een equivalent schema, bestaande uit de berekende spanningsbron in serie met de berekende weerstand.

Het theorema van Norton

Ook het theorema van Norton is een methode om ingewikkelde gesloten lussen te vervangen door eenvoudigere equivalente schakelingen. Nu bestaat de equivalente schakeling echter uit de parallelschakeling van een stroombron en een weerstand. In figuur 3/2.7-18 wordt als voorbeeld dezelfde gesloten lus als die van figuur 3/2.7-17 omgezet in een Nortonschakeling.

Ook nu gaat het omzetten in twee fasen.

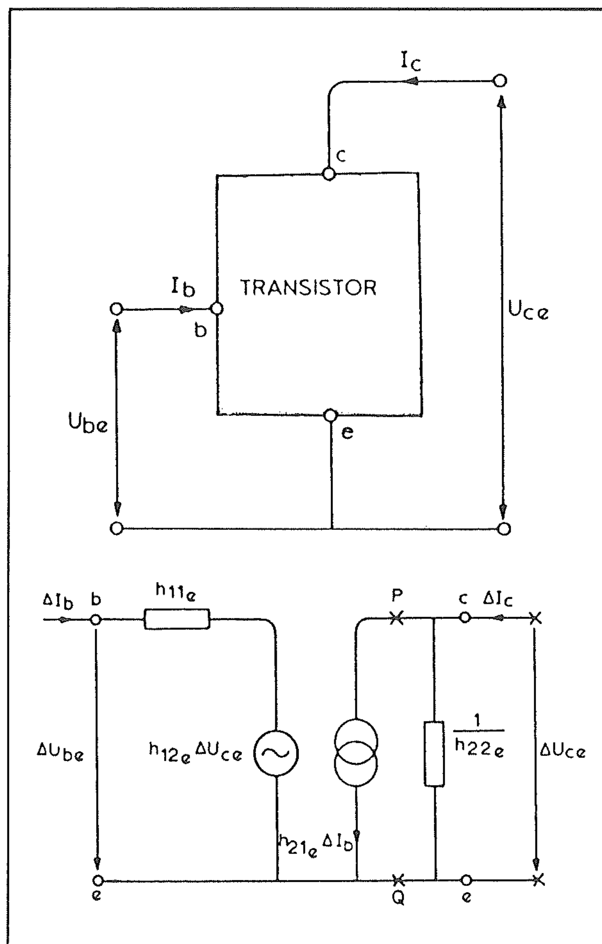
- Fase 1
  Sluit de klemmen A en B van de gesloten lus kort en bereken de stroom die in deze kortsluiting zal lopen. Dit is voorgesteld in het middelste schema van figuur 3/2.7-18. In het voorbeeld zal de stroom 9 V gedeeld door 100 Ω is gelijk aan 90 mA zijn. Deze stroom wordt I_o genoemd.
- Fase 2
  Bereken nu weer de totale weerstand van de gesloten lus, door alle spanningsbronnen kort te sluiten en middels de wetten van Kirchhoff de vervangingsweerstand tussen de punten A en B te berekenen. Deze weerstand wordt R_i genoemd. In het voorbeeld is deze weerstand gelijk aan 50 Ω.

Het Norton-equivalent van de gesloten lus bestaat dus uit de parallelschakeling van een stroombron die 90 mA levert en een weerstand van 50 Ω.

Thévenin en Norton in de praktijk

Beide theorema's lijken op het eerste zicht voer voor theoretici. Dat is echter absoluut niet het geval. Met Thévenin en Norton kan men bijvoorbeeld een transistortrap voorstellen door een vierpool, waar de vier parameters van de halfgeleider (h_{11}, h_{12}, h_{21} en h_{22}) in verwerkt

zijn. Hoewel dit principe uitvoerig behandeld is in hoofdstuk 3/11.1, worden hier de resultaten nog eens voorgesteld in figuur 3/2.7-19.



Figuur 3/2.7-19: Praktische toepassing van de theorema's van Thévenin en Norton: het voorstellen van een transistortrap door een vierpool.

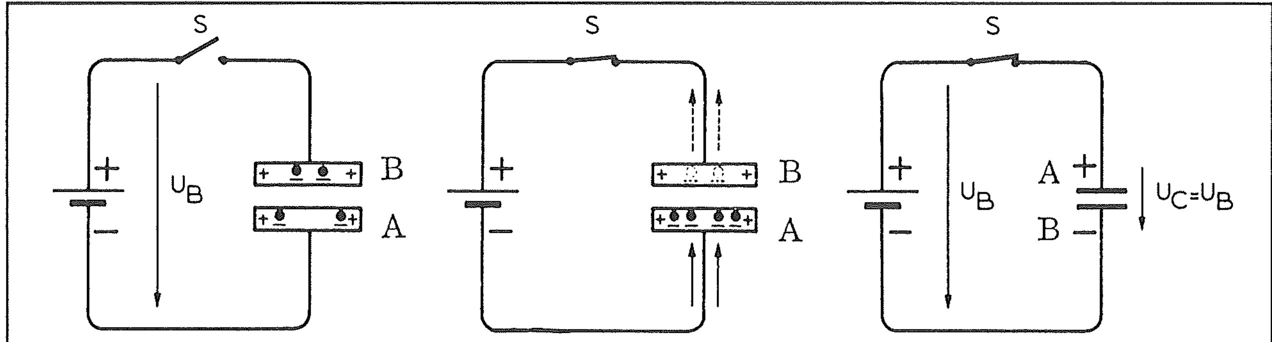
Uit deze figuur blijkt duidelijk dat de ingangskring (basis) kan gereduceerd worden tot een Thévenin-equivalent, bestaande uit een weerstand H_{11} en een spanningsbron $h_{12}.\Delta U_{ce}$. De uitgangskring (collector) kan voorgesteld worden door een Norton-equivalent, opgebouwd uit een stroombron $h_{21}.\Delta I_b$ en een weerstand $1/h_{22}$. Dank zijn deze vereenvoudigingen tot equivalenten is het mogelijk de eigenschappen van de trap, zoals versterkingsfactor, ingangs- en uitgangsimpedantie, gemakkelijk te berekenen. Wie ooit de behoefte voelt om wiskundig te gaan stoeien met netwerken, kan niet om de Heren Thévenin en Norton heen lopen!

Schakelingen met condensatoren

Stroom door een condensator?

Alvorens de serie- en parallelschakelingen van condensatoren wordt besproken, moet eerst een groot misverstand opgelost worden. Vaak zal in de rest van dit hoofdstuk geschreven worden over *"een stroom die door een condensator vloeit"*. Nu weet men echter dat een condensator bestaat uit twee geleidende platen, die van elkaar zijn gescheiden door een *isolator*. Het is dus erg vreemd om te stellen dat er door een dergelijk onderdeel een stroom kan lopen. Immers, als men een condensator aansluit op een weerstandsmeter, zal men vaststellen dat het apparaat een oneindig hoge weerstand aanwijst. Gelukkig maar, want anders was de condensator defect. Maar hoe kan een onderdeel, dat een oneindig hoge weerstand heeft, stroom doorlaten? Dit wordt verklaard aan de hand van figuur 3/2.7-20.
De condensator wordt via een schakelaar S aangesloten op een spanningsbron U_B. Als de schakelaar open staat gebeurt er niets. De metalen platen van de condensator bevatten uiteraard een heleboel vrije elektronen, maar die zijn in evenwicht met de positief geladen atomen, waaruit zij ontsnapt zijn.

2.7 Weerstanden en condensatoren in de praktijk



Figuur 3/2.7-20: De verklaring van het feit dat door een condensator, een onderdeel met een oneindig hoge weerstand, toch stroom kan vloeien.

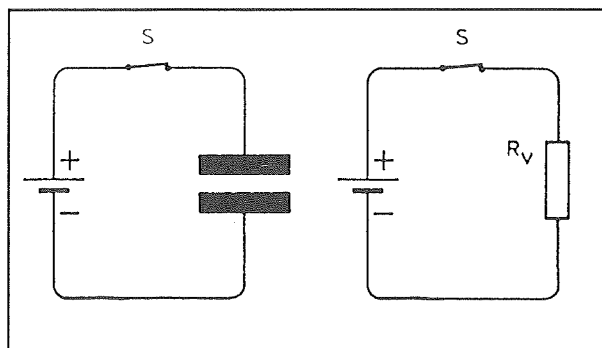
Er gebeurt niets anders dan dat er in beide platen een chaotische beweging is van elektronen, die van atoom naar atoom springen. De resulterende lading op beide platen is nul. Als de schakelaar gesloten wordt, wordt de bovenste plaat echter verbonden met de positieve pool van de spanningsbron en de onderste plaat met de negatieve pool. De vrije elektronen van de bovenste plaat zullen aangetrokken worden door de positieve lading op de positieve pool van de spanningsbron. Er ontstaat dus een stroom van vrije elektronen, die in de getekende richting van bovenste plaat naar positieve pool vloeien. Die vrije elektronen worden door elektrochemische verschijnselen in de spanningsbron getransporteerd naar de negatieve pool. Van daaruit worden zij als het ware verder gestuwd naar de onderste plaat van de condensator. In de bovenste plaat van de condensator ontstaat een gebrek aan vrije elektronen, dus een positieve lading. In de onderste plaat ontstaat een overschot aan vrije elektronen, dus een negatieve lading. Ondanks het feit dat er geen enkel elektron door het isolerende diëlektricum tussen beide platen dringt en er geen sprake is van een gesloten stroomkring, vloeien er toch vrije elektronen door de twee verbindingsdraden. Deze elektronen transporteren lading van de spanningsbron naar de condensator. Het transporteren van elektrische lading heeft altijd een elektrische stroom tot gevolg. En hoewel deze "stroom" niet *door* de condensator vloeit, lijkt het toch alsof er een stroom door de keten stroomt.

Die stroom blijft echter niet vloeien! Door de ladingen op beide platen van de condensator ontstaat over de condensator een elektrisch veld. Dit is weer verantwoordelijk voor een potentiaal verschil tussen beide platen. In het begin is dit potentiaal verschil klein, maar naarmate er meer lading van de bron naar de condensator wordt verplaatst, wordt dit steeds groter. Op een bepaald moment is dit potentiaal verschil over de platen van de condensator net zo groot als de emk spanning van de bron (rechter tekening). Op dat moment is er ladingsevenwicht en houdt het transport van lading, dus van elektronen, op. De "stroom" wordt nul.

Het verschil tussen I_R en I_C

Men moet zich heel goed realiseren dat er een wezenlijk verschil bestaat tussen de stroom die door een weerstand vloeit en de "stroom" die door een condensator vloeit! Dit verschil is zo cruciaal dat het goed is er even dieper op in te gaan. In figuur 3/2.7-21 zijn beide situaties getekend. Als, zoals rechts getekend, een weer-

stand via een schakelaar S op een spanningsbron wordt aangesloten en de schakelaar wordt gesloten, dan ontstaat er een rondgaande beweging van vrije elektronen. Een vrij elektron vertrekt als het ware uit de negatieve pool van de voeding, snelt door de onderste verbinding, wurmt zich door het wrijving biedende materiaal van de weerstand, komt aan de bovenzijde weer uit de weerstand tevoorschijn en spoedt zich naar de positieve pool van de batterij. Hoewel die elektronenstroom zo groot is dat er over de weerstand een spanningsval wordt opgebouwd die gelijk is aan de emk-waarde van de bron, betekent dit niet dat de stroom ophoudt. Om de spanningsgelijkheid in de kring te handhaven moet er namelijk een constante stroom door de schakeling vloeien. Op het moment dat de schakelaar wordt gesloten, wordt de ***spanningsval over de weerstand onmiddellijk gelijk aan de emk-waarde*** van de spanningsbron. Als de schakelaar weer geopend wordt, valt de stroom terug naar nul. Het gevolg is dat ***de spanningsval over de weerstand meteen gelijk wordt aan nul.***

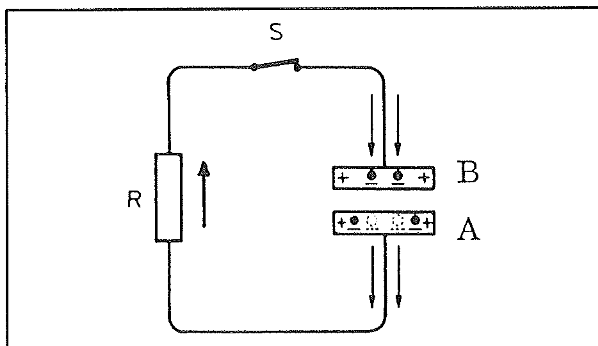


Figuur 3/2.7-21: Het vergelijken van het vloeien van stroom door een weerstand en door een condensator.

Nu naar de condensator. Als de schakelaar gesloten wordt, dan ontstaan er twee elektronenbewegingen. Een elektron vertrekt uit de negatieve pool van de spanningsbron naar de onderste plaat van de condensator. Deze plaat wordt hierdoor negatief geladen. Op hetzelfde moment vertrekt ***een ander elektron*** uit de bovenste plaat van de condensator en snelt naar de positieve pool van de spanningsbron. De bovenste plaat wordt hierdoor positief geladen. Door deze twee tegengestelde ladingen ontstaat er een elektrisch veld tussen de platen van de condensator, een veld dat verantwoordelijk is voor het ontstaan van een veldspanning over de condensator. Omdat ladingen nooit in een oneindig korte tijd van punt A naar punt B getransporteerd kunnen worden, zal ***de veldspanning over de condensator er een bepaalde tijd over doen om gelijk te worden aan de emk van de spanningsbron.*** Op het moment dat beide spanningen aan elkaar gelijk worden, houden beide elektronenstromen op te bestaan. Dit verschijnsel noemt men ***het laden van de condensator.*** Na het sluiten van de schakelaar vloeit er dus slechts heel even een "stroom" door de kring. Als de schakelaar weer geopend wordt gebeurt het volgende. De stroom was reeds nul, dus daar verandert niets aan. De beide platen van de condensator zijn echter nog steeds met zoveel lading opgeladen, dat de veldspanning over het onderdeel gelijk is aan de emk-spanning van de bron. Ook na het openen van de schakelaar blijft deze lading in de platen van de condensator aanwezig. Het gevolg is dat ***de veldspanning over de condensator gelijk blijft aan de emk-waarde van de spanningsbron!*** Een condensator, die opgeladen is tot een bepaalde veldspanning, houdt deze spanning, ook als de verbinding tussen condensator en spanningsbron wordt verbroken. Een geladen condensator kan men dus beschouwen als

2.7 Weerstanden en condensatoren in de praktijk

een soort van batterij, die in staat is elektrisch vermogen te leveren. Als men over de geladen condensator een weerstand parallel schakelt, zie figuur 3/2.7-22, dan stelt men vast dat er een stroom door het circuit gaat vloeien. Deze keer is dit een "echte" stroom, want een elektron uit de negatief geladen condensatorplaat spoedt zich naar de weerstand, wringt zich door het weerstand biedende weerstandsmateriaal, komt aan de bovenzijde van de weerstand weer tevoorschijn en gaat dan naar de positief geladen plaat van de condensator. Omdat het verschil in lading tussen beide platen hierdoör afneemt, zal ook de veldspanning over de condensator kleiner worden. Na een bepaalde tijd bestaat er weer ladingsevenwicht in de kring, met als gevolg dat er geen stroom meer loopt en de veldspanning over de condensator gelijk in aan nul. Dit verschijnsel noemt men ***het ontladen van de condensator***.



Figuur 3/2.7-22: Het ontladen van een condensator.

Condensatoren in parallelschakeling

Als men twee condensatoren C1 en C2 parallel schakelt, zoals getekend in figuur 3/2.7-23, kan men de totale vervangingswaarde C_{tot} berekenen. Als de schakelaar S gesloten wordt, laden beide condensatoren zich op totdat hun veldspanningen gelijk zijn aan de emk-waarde van de batterij. De totale lading die verplaatst wordt is dus gelijk aan:

$Q_{tot} = Q_1 + Q_2$

Nu weet men uit een vorig hoofdstuk dat:

$Q = C \cdot U$

Of:

$C_{tot} \cdot U = (C_1 \cdot U) + (C_2 \cdot U)$

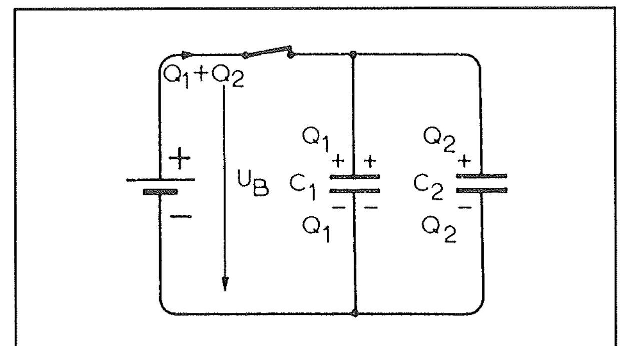
Die U is uiteraard gelijk aan d emk-waarde van de spanningsbron, zodat zij zowel links als rechts geschrapt kan worden:

$C_{tot} = C_1 + C_2$

Schakelt men condensatoren parallel, dan is de vervangingswaarde gelijk aan de som van de capaciteiten.

In het algemeen, bij een parallelschakeling van n condensatoren:

$C_{tot} = C_1 + C_2 + C_3 + ... + C_n$



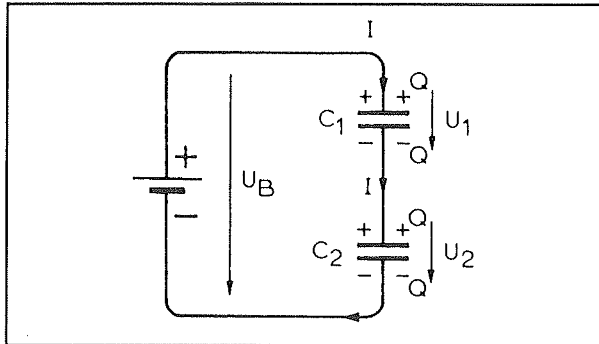
Figuur 3/2.7-23: Het parallel schakelen van condensatoren.

Condensatoren in serieschakeling

Condensatoren kan men natuurlijk ook in serie schakelen, zoals getekend in figuur 3/2.7-24. Bij het verbinden van de serieschakeling met een spanningsbron loopt er even een laadstroom I door de kring. Het gevolg is dat beide condensatoren worden opgeladen en er over beide onderdelen een veldspanning ontstaat.

De som van de twee veldspanningen is gelijk aan de emk-waarde van de spanningsbron. Dus:

$U_1 + U_2 = U_B$



Figuur 3/2.7-24: Het is serie schakelen van condensatoren.

Algemeen geldt echter:

$$U = \frac{Q}{C}$$

Dus:

$$\frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} = \frac{Q_{tot}}{C_{tot}}$$

Er vloeit in de kring echter slechts één stroom I. Het gevolg is dat de ladingen over de condensatoren identiek moeten zijn.

Dit is als volgt in te zien. Over condensator C1 ontstaat een lading van Q. De bovenste plaat draagt de positieve lading van +Q, de onderste de negatieve lading van Q-. De onderste plaat van C1 is echter rechtstreeks verbonden met de bovenste plaat van C2. Tussen deze geleidende punten kan geen ladingsverschil bestaan. Dat is alleen het geval als de bovenste plaat van C2 op een lading van +Q staat! Deze positieve lading veroorzaakt in de onderste plaat van C2 een even grote negatieve lading -Q.

Gevolg:

$$Q_1 = Q_2 = Q_{tot} = Q$$

Invullen in de vorige formule:

$$\frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} = \frac{Q}{C_{tot}}$$

Links en rechts delen door Q levert:

$$\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{C_{tot}}$$

Meer algemeen, als men n condensatoren in serie zet, dan wordt de totale vervangingswaarde gegeven door:

$$\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots + \frac{1}{C_n}$$

Voor het speciale geval van twee in serie geschakelde condensatoren kan men de formule ook schrijven als:

$$C_{tot} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

Conclusie

De formules voor serie en parallel schakelen van weerstanden en condensatoren zijn identiek. Het grote verschil is echter dat de formule voor het in serie schakelen van weerstanden bij condensatoren geldt voor de parallelle schakeling en vice versa.

De RC-kring

Inleiding

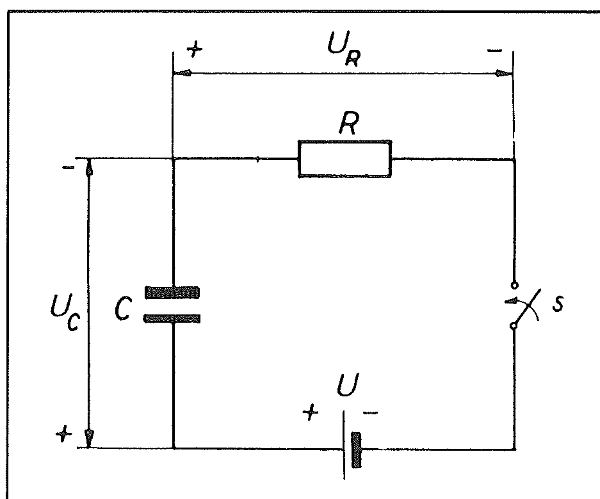
Het speciale verschijnsel, dat ontstaat als men een condensator met een spanningsbron verbindt, namelijk het laden van de condensator, heeft tal van praktische toepassingen. Men kan namelijk het laden van de condensator beïnvloeden door een weerstand in serie met de condensator op te nemen. Hierdoor ontstaat een ontlaadkring, met speciale eigenschappen.

De RC-laadkring

Stel dat men, zoals getekend in figuur 3/2.7-25, een condensator C en een weerstand R via een schakelaar S in serie aansluit op een spanningsbron U. Men sluit de schakelaar en onderzoekt wat er in de kring gebeurt.

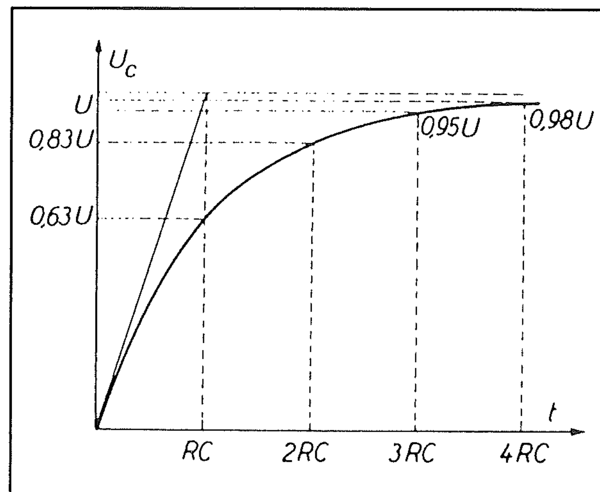
Op het moment dat de schakelaar wordt gesloten is de spanning over de condensa-

tor gelijk aan nul. Er gaat nu een laadstroom door de kring vloeien, waarvan de grootte in eerste instantie bepaald wordt door de waarde van de weerstand. Het gevolg is dat er lading wordt getransporteerd van de bron naar de condensator.



Figuur 3/2.7-25: De RC-laadkring, aangesloten op een spanningsbron.

Deze lading bouwt een spanning U_C op over de condensator met de getekende polariteit. Er staan dan twee bronnen in serie, namelijk U en U_C, die tegengestelde polariteit hebben. Het gevolg is dat de spanning over de weerstand daalt. Maar als er over een weerstand een spanningsdaling optreedt, kan dat niets anders betekenen dan dat ook de stroom daalt. De laadstroom van de condensator wordt dus kleiner, met als gevolg dat er per tijdseenheid minder lading naar van de bron naar de condensator getransporteerd wordt. Naarmate het proces vordert, zal de stroom door de kring steeds kleiner worden en de veldspanning over de condensator steeds minder snel stijgen. Als men dus een grafiekje opstelt van het spanningsverloop over de condensator in functie van de tijd, ontstaat het typische beeld van figuur 3/2.7-26.



Figuur 3/2.7-26: De laadkurve van een condensator in een RC-kring.

Op t = 0 is de condensatorspanning 0 V. Eerst gaat de spanning heel erg snel stijgen. Naarmate de tijd verstrijkt gaat de spanning steeds minder snel stijgen. Na een heel lange tijd zal de veldspanning over de condensator precies gelijk zijn aan de emk-spanning van de bron. De stroom in de kring wordt dan nul, het systeem is in rust. De condensator is volledig opgeladen.

Het begrip tijdconstante τ

De snelheid waarmee een en ander gebeurt is niet alleen afhankelijk van de waarde van de weerstand, maar ook van de waarde van de condensator. Immers, de veldspanning over een condensator wordt gegeven door de uitdrukking:

$$U = \frac{Q}{C}$$

Hoe groter de condensator, hoe minder snel de veldspanning zal toenemen.

Dat dubbele verband wordt uitgedrukt door ***de tijdconstante*** van de RC-kring. De tijdconstante wordt voorgesteld door de griekse letter τ, uitgesproken als "tau" en is gelijk aan:

$$\tau = R \cdot C$$

2.7 Weerstanden en condensatoren in de praktijk

De definitie van de tijdconstante τ is als volgt: ***de tijdconstante τ is de tijd die nodig is om een condensator via een weerstand op te laden tot een veldspanning, die gelijk is aan 63 % van de waarde U van de emk van de spanningsbron.*** Zoals uit de grafiek blijkt is de condensatorspanning na $4.\tau$ gestegen tot 98 % van de bronspanning.

De eenheid van τ

Uit de definitie van de tijdconstante volgt iets vreemds. τ is een tijd en moet dus als eenheid de seconde hebben. Maar τ is gelijk aan het product van weerstand en capaciteit. Hoe kan dit product de seconde als eenheid hebben? Toch kan dit gemakkelijk aangetoond worden. Immers, de spanning over een condensator wordt gegeven door:

$$U = \frac{Q}{C}$$

Uit de definitie van lading, het vloeien van stroom gedurende een bepaalde tijd, kan men echter afleiden:

$$Q = I \cdot t$$

Dus:

$$U = \frac{I \cdot t}{C}$$

Als men C van rechts naar links verplaatst en U van links naar rechts ontstaat:

$$C = \frac{I \cdot t}{U}$$

Maar nu is, als gevolg van de wet van Ohm:

$$\frac{I}{U} = \frac{1}{R}$$

Dus:

$$C = \frac{1}{R} \cdot t$$

Vul nu deze waarde van C in de formule van τ in:

$$\tau = R \cdot \frac{1}{R} \cdot t = t$$

De tijdconstante τ is dus inderdaad niets anders dan een tijd!

Het belang van de tijdconstante

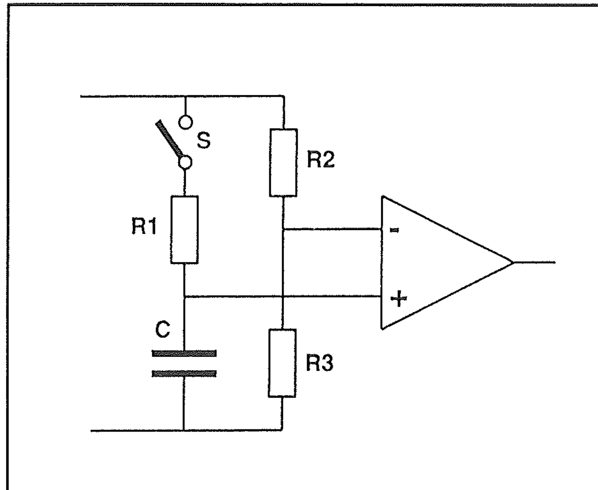
De tijdconstante van een RC-kring is een zeer belangrijke en praktische parameter in de elektronica. Stel bijvoorbeeld, dat men ergens in een schakeling een tijdvertraging van één seconde moet realiseren tussen een eerste en een tweede verschijnsel. Dat kan door gebruik te maken van de schakeling die in figuur 3/2.7-27 getekend is. De inverterende ingang van een comparator wordt door middel van een spanningsdeler R2/R3 ingesteld op 63 % van de voedingsspanning. De niet-inverterende ingang van de comparator is verbonden met het knooppunt tussen de R en de C van een RC-kring. Een schakelaar S laadt, als hij wordt gesloten, de condensator C1 op via de weerstand R1. Na 1 s moet de spanning over de condensator gestegen zijn tot 63 % van de voedingsspanning. Dan zal de comparator immers na 1 s een uitgangspuls genereren. De waarde van τ is dus 1 s. Het volstaat nu eerst een waarde voor de condensator te kiezen om nadien weerstand te kunnen berekenen met de formule:

$$R = \frac{\tau}{C}$$

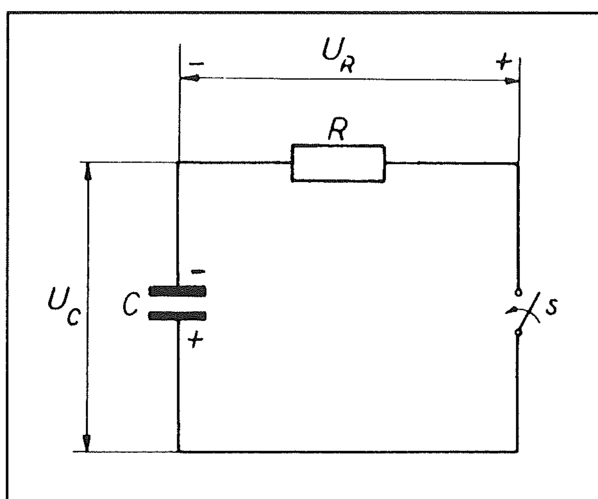
De RC ontlaadkring

Stel, dat men een geladen condensator C door middel van een schakelaar S kortsluit over een weerstand R, zoals getekend in figuur 3/2.7-28. Men stelt de laadspanning U_C van de condensator gelijk aan V. Op het moment dat de schakelaar gesloten wordt zal er een stroom door de kring gaan vloeien. Deze stroom heeft tot gevolg dat de in de opgeslagen condensator verzamelde lading afvloeit. De spanning U_C over de condensator gaat dus dalen.

2.7 Weerstanden en condensatoren in de praktijk

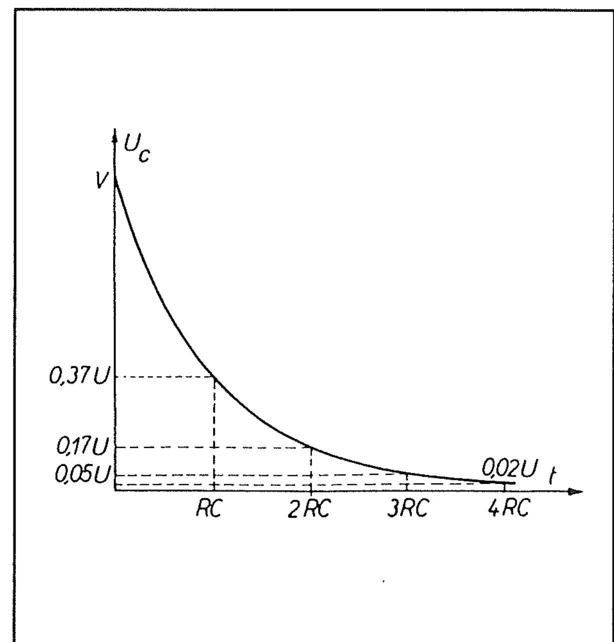


Figuur 3/2.7-27: Een praktische toepassing, waaruit het belang van de tijdconstante τ blijkt.



Figuur 3/2.7-28: Het ontladen van een geladen condensator C over een weerstand R.

Ook nu kan men een grafiekje opstellen, waarin het verband wordt gegeven tussen het verloop van de condensatorspanning U_C en de tijd. Dit grafiekje is getekend in figuur 3/2.7-29. Het zal geen verbazing wekken dat de condensatorspanning in het begin vrij snel daalt. De ontlaadstroom is dan immers groot. Naarmate echter de spanning daalt zal er steeds minder stroom door de weerstand vloeien en zal de spanning over de condensator dus steeds trager dalen. Maar hoe traag dat ook gaat, uiteindelijk zal de condensatorspanning gelijk worden aan 0 V. De condensator is dan volledig ontladen. Met stelt vast dat de condensatorspanning tot 37 % van zijn beginwaarde V gedaald is na één tijdconstante τ. Na 4.τ staat er nog maar 2 % van de beginspanning over het onderdeel.

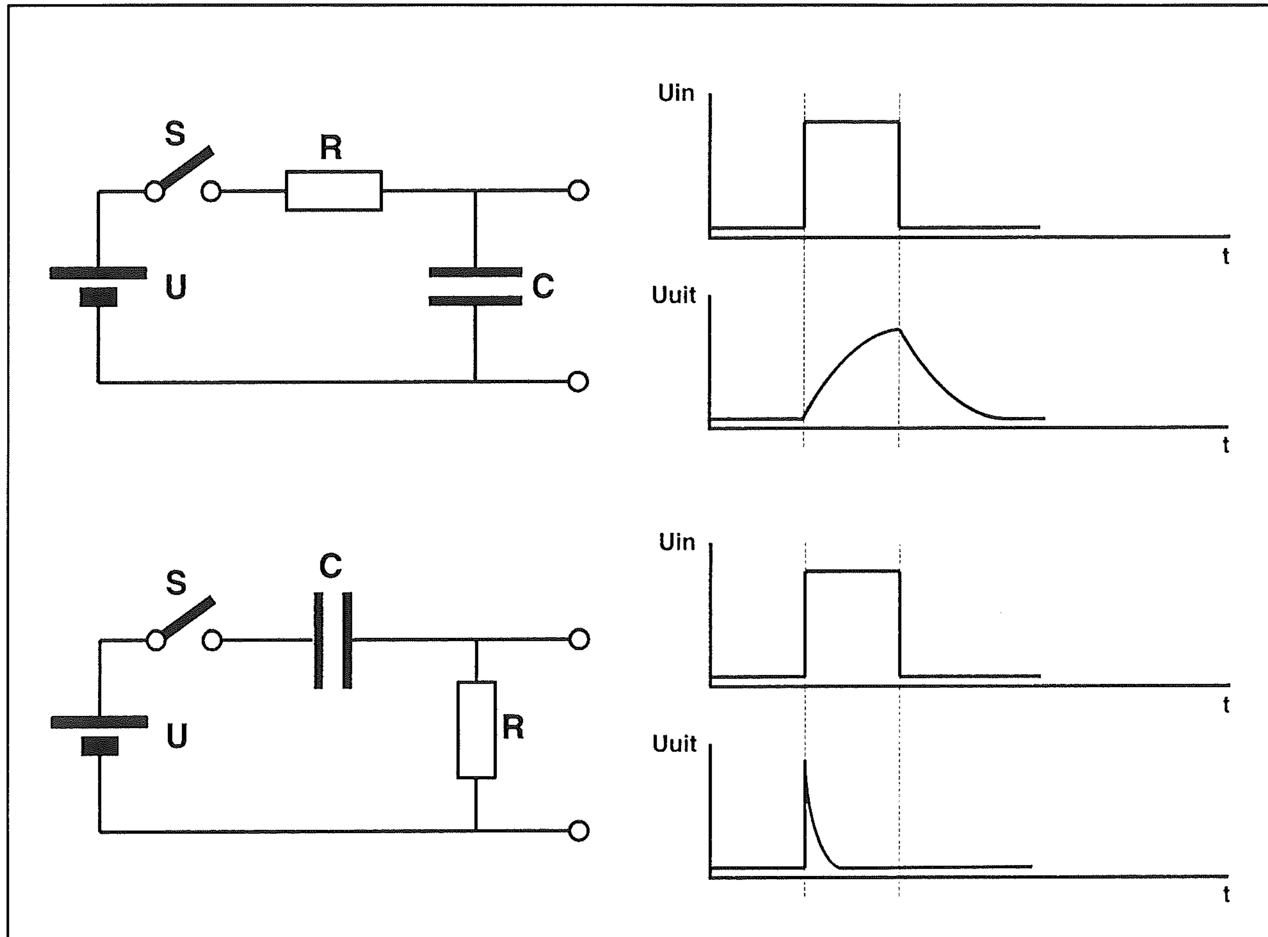


Figuur 3/2.7-29: De ontlaadcurve van een condensator in een RC-kring.

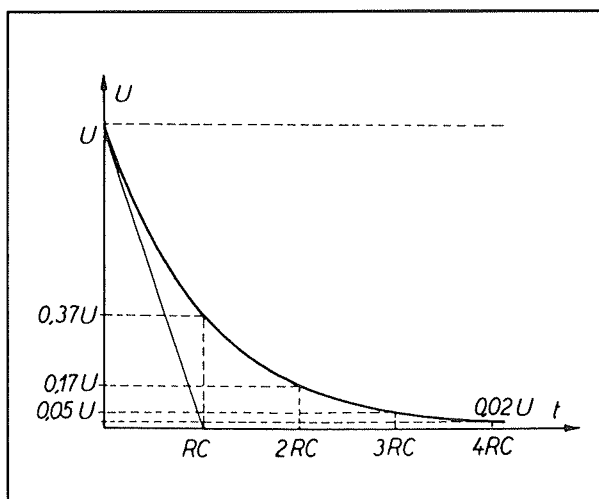
De spanning over de weerstand

Tot nu toe is het spanningsverloop over de condensator als belangrijke grootheid gebruikt. Maar natuurlijk zal de spanning over de weerstand ook een bepaald verloop hebben. Het zal, bij het laden uit een spanningsbron, duidelijk zijn dat de spanning over de weerstand op ieder moment van het proces gelijk is aan de constante bronspanning minus de stijgende spanning over de condensator.

2.7 Weerstanden en condensatoren in de praktijk



Figuur 3/2.7-31: De werking van integrator en differentiator grafisch toegelicht.



Figuur 3/2.7-30: Het verloop van de spanning over de weerstand bij de RC-laadkring.

Dat is in te zien, maar kan met de wetten van Thévenin ook aangetoond worden. In het begin van de lading, als de condensatorspanning nog 0 V is, is de spanning over de weerstand gelijk aan de bronspanning. Na 1.τ is de spanning over de weerstand gedaald tot 37 % van de bronspanning. Het grafisch verloop in functie van de tijd is getekend in figuur 3/2.7-30.

Integratoren en differentiatoren

In figuur 3/2.7-31 zijn de twee praktische toepassingen van de RC-kring getekend. In de bovenste figuur wordt de spanning over de condensator als uitgangsspanning beschouwd. Als men een korte spannings-

2.7 Weerstanden en condensatoren in de praktijk

puls op de ingang aansluit, door het even sluiten en dan weer openen van de schakelaar S, dan zal deze smalle puls door de condensator breder gemaakt worden. Men spreekt van een ***integrator of integrerende schakeling.***

In het onderste schema zijn weerstand en condensator van plaats verwisseld. De spanning over de weerstand is nu de uitgangsspanning. Als men dezelfde smalle puls aan de schakeling aanbiedt, stelt men vast dat er over de weerstand een veel smallere, naaldvormige puls ontstaat. Na $4.\tau$ is de spanning over de weerstand immers nog slechts 2 % van de ingangsspanning. De schakeling kan dus gebruikt worden als pulsversmaller. Uiteraard is de breedte van de naaldpuls afhankelijk van de waarde van τ en dus van de waarde van de toegepaste onderdelen. Men spreekt van een ***differentiator of differentiërende schakeling.***

Zowel integrator als differentiator hebben talloze toepassingen in de praktische elektronica, en dan voornamelijk in tijdschakelingen. Onderzoek maar eens twintig nabouwschakelingen uit deel 4, die iets doen met tijd en in de meeste gevallen zal men op tal van plaatsen integratoren en differentiatoren ontdekken!

2.7 Weerstanden en condensatoren in de praktijk

3/2.13

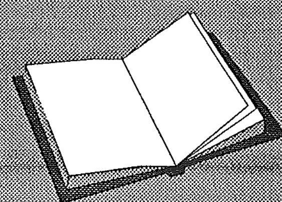
Elektrochemie

Inleiding

Wat is elektrochemie?
Elektrochemie is de tak van de elektriciteit die zich bezig houdt met de wederzijdse omzetting van elektrische energie in chemische energie. Een zeer belangrijke tak der wetenschap, want zonder de elektrochemie zouden er geen batterijen en knoopcellen bestaan en zou de hedendaagse wereld er dus heel anders uitzien! Immers, ondanks het feit dat de meeste mensen het niet bewust als dusdanig ervaren, batterijen, cellen en accumulatoren maken een belangrijk deel uit van de menselijke omgeving. Geen startende auto's zonder loodaccu, geen elektronische polshorloges zonder knoopcellen, zelfs geen hartstimulatoren zonder moderne batterijen.

Wat behelst elektrochemie?
Het verschijnsel elektrochemie kan in twee gebieden gesplitst worden. Op de eerste plaats kent men de omzetting van chemische energie in elektrische, processen die aan de basis staan van alle accumulatoren en batterijen. Daarnaast kent men de omzetting van elektrische energie in chemische, samen te vatten onder de termen elektrolyse en galvanotechniek. Met deze technieken is het mogelijk waterige oplossingen van zouten te ontleden in hun atomen, maar ook een stuk metaal te voorzien van een dunne laag van een ander metaal.
Vooral dat laatste procédé kent tal van toepassingen, heel veel gouden sieraden zijn eigenlijk gemaakt van zilver, waarop een heel dun laagje goud is aangebracht. Ook in de elektronica wordt veel gebruik gemaakt van galvaniseren. Koperen printen worden galvanisch voorzien van een dun laagje tin om de soldeerbaarheid te verhogen. De edge-connectoren van printen worden op dezelfde manier voorzien van een dun laagje goud. Hetzelfde gebeurt met de contacten van het betere soort relais en schakelaars.
Kortom, de elektrochemie heeft tal van onvermoede toepassingen!

LEES OOK:
Hoofdstuk 3/2.4
Hoofdstuk 3/2.5
Hoofdstuk 3/3.23
Hoofdstuk 3/3.36
Hoofdstuk 4/8.6
Hoofdstuk 4/8.16
Hoofdstuk 4/14.10



Historische ontwikkeling

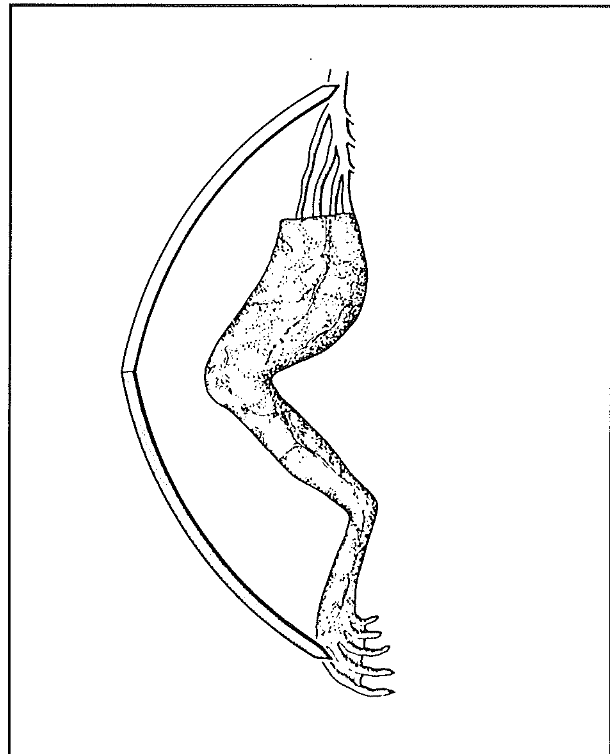
Elektriciteit en chemie

Dat elektriciteit en chemie van alles en nog wat met elkaar te maken hebben, was al heel vroeg in de geschiedenis duidelijk. Men wist uit ervaring dat elektriciteit in staat is spieren te laten samentrekken. Een van de primitiefste manieren om de aanwezigheid van elektriciteit te detecteren was gebruik te maken van de grote spier in de poot van een vers geslachte kikker. Als men de twee uiteinden van deze spier via geleidende draden verbond met twee punten, waartussen men de aanwezigheid van elektriciteit vermoedde en de spier trok samen, dan wist men dat het vermoeden juist was.

Luigi Galvani

Uit experimenten bleek echter ook, dat kikkerspieren konden samentrekken zonder dat er sprake was van externe elektriciteit. Een van de eerste onderzoekers, die een fundamenteel onderzoek naar deze verbanden heeft ingesteld, was de Italiaan Luigi Galvani. Een van zijn beroemdste proeven was het kikkerexperiment. Als men, zoals geschetst in figuur 3/2.13-1, de twee uiteinden van een kikkerspier verbindt met twee draden, die uit ***verschillende*** metalen zijn gemaakt en men verbindt die twee draden met elkaar, dan zal men vaststellen dat de spier krachtig samentrekt.

Galvani trok hieruit de terechte conclusie dat in het gesloten systeem koper, ijzer en spier op de een of andere manier elektriciteit aanwezig was. Galvani was echter nog te zeer een man van zijn tijd om hieruit echte wetenschappelijke conclusies te trekken. Hij dacht dat de oorzaak van het verschijnsel te danken was aan het bestaan van “dierlijke elektriciteit” en was er zelfs een tijd lang van overtuigd de “universele levenskracht” ontdekt te hebben.



Figuur 3/2.13-1: Het beroemde experiment van Galvani, dat aan de basis staat van de gehele elektrochemie.

Allessandro Volta

Zijn landgenoot Allessandro Volta trok wél de juiste wetenschappelijke conclusie. Volgens hem deed de spier er niets toe en was nog steeds niets meer dan het instrument, waarmee de aanwezigheid van elektriciteit werd vastgesteld. De elektriciteit was het gevolg van het feit dat twee verschillende metalen in contact met elkaar werden gebracht. Immers, als men het experiment van Galvani uitvoerde met twee draden uit hetzelfde metaal gebeurde er helemaal niets. Volta ging experi-

menteel aan de slag met zijn visie en ontdekte al snel dat er helemaal geen dierlijk materiaal noodzakelijk was om elektriciteit te produceren. Als men twee geleiders uit verschillend metaal in een geleidende oplossing bracht, dan ontstond er tussen de twee geleiders een spanningsverschil. Op deze manier was Volta in staat de eerste primitieve batterij te maken, die door het leven gaat onder de naam "Volta-cel" of ook wel eens "Zuil van Volta". Deze bestond uit een glazen vat, gevuld met een verdunde oplossing van zwavelzuur. In dit vat werden een koperen en een zinken plaat opgehangen. Volta kon aantonen dat tussen de twee platen een spanning van ongeveer 1,1 V ontstond. Volta kon bovendien bewijzen dat zijn zuil niet alleen elektrische spanning genereerde, maar dat het ook mogelijk was er een elektrische stroom uit te trekken. Dat stelde de geleerden van die tijd voor een groot probleem. Het begrip "elektron" was nog onbekend, maar men wist wel dat elektrische stroom uit "iets" moest bestaan. Dat "iets" moest dus ook door de geleidende oplossing van de Volta-zuil vloeien. Het zou nog heel lang duren voor dit verschijnsel wetenschappelijk verklaard kon worden.

Het principe van de elektrochemische cel

De bouw van de materie

Om het principe van de elektrische cel te doorgronden was het noodzakelijk dat de wetenschap iets meer zicht kreeg op de bouw van de materie. Toen men eenmaal zo ver was, dat men wist dat stoffen bestaan uit moleculen en atomen en dat deze atomen een positieve kern hebben en een negatieve lading rond die kern, opgeslagen in de elektronen, kon men aan de slag om de door Volta en tijdgenoten experimenteel aangetoonde verschijnselen te verklaren.

Elektrolytische dissociatie

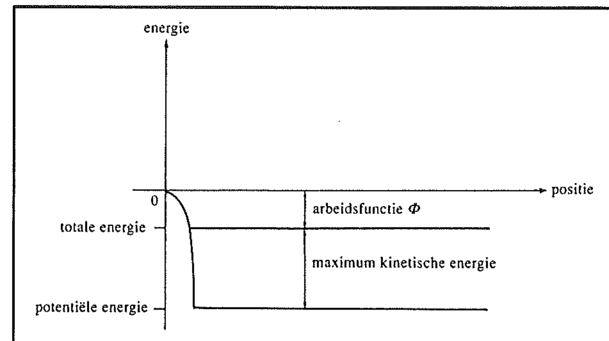
In 1884 toonde de Zweedse scheikundige Svante Arrhenius aan dat als men bepaalde chemische stoffen oplost in water deze oplossing de elektrische stroom kan geleiden. Dergelijke stoffen werden "elektrolyten" genoemd, een woord dat uit enige Griekse begrippen bestaat en vrij vertaald kan worden als "vloeibare stoffen met elektrische eigenschappen". Arrhenius vermoedde dat deze geleiding ontstond doordat de atomen van de stof zich splitsten in afzonderlijke positieve en negatieve delen, die zich vrij door de vloeistof kunnen verplaatsen. Deze geladen deeltjes werden "ionen" genoemd. Omdat een atoom op zich elektrisch neutraal is, was het duidelijk dat de lading van alle positieve ionen in de vloeistof precies gelijk moest zijn aan de lading van alle negatieve ionen in de vloeistof, zodat het geheel toch elektrisch neutraal bleef. Het verschijnsel dat stoffen, die op zich absoluut geen geleiders van elektriciteit zijn, dit wél gaan doen als zij opgelost worden in water, werd door Arrhenius "elektrolytische dissociatie" genoemd.

Gedrag van vrije elektronen in metalen

Een tweede verschijnsel dat verklaard moet worden is hoe elektronen zich in metalen gedragen. In hoofdstuk 3/2.4 werd reeds beschreven dat elektronen zich in geleidende stoffen nogal vrij van atoom naar atoom kunnen bewegen. Men spreekt dan ook van "vrije elektronen". Een vrij elektron springt als het ware van

2.13 Elektrochemie

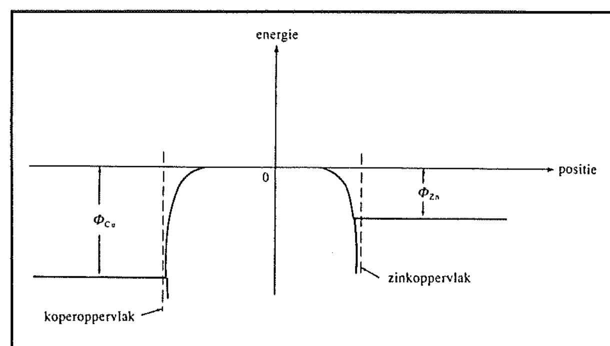
atoom naar atoom en vormt dus als het ware een spoor van positieve ionen. Atomen, die een elektron kwijt zijn en daardoor positief geladen worden. Deze "gaten" worden weer opgevuld door andere vrije elektronen, zodat het blok metaal op zich elektrisch neutraal is.
Beweging is een vorm van energie. De bewegende vrije elektronen in de geleider hebben dus een bepaalde kinetische bewegingsenergie. De grootte van deze energie is afhankelijk van de eigenschappen van de geleider. Energetische elektronen hebben in principe de mogelijkheid om volledig uit een atoomverband te ontsnappen.
De kinetische energie van vrije elektronen in een metaal is echter te klein om de elektronen de mogelijkheid te geven uit het metaal te ontsnappen. Het brok metaal vormt als het ware een gevangenis voor de vrije elektronen, waaruit geen ontsnappen mogelijk is. Dat kan alleen als er op de een of andere manier extra energie aan de vrije elektronen zou worden aangeboden of als de noodzakelijke energie om uit te treden op de een of andere manier lager wordt.
In een karakteristiek metaal is het tekort aan energie om te kunnen ontsnappen vrij klein, maar een paar elektronVolt (eV). Toch blijven de vrije elektronen in het metaal, omdat er geen mogelijkheid aanwezig is om deze extra energie te verwerven. Deze "uittreed-energie" wordt in de natuurkunde aangeduid met de term "arbeidsfunctie" of "drempel potentiaal" en voorgesteld door de Griekse letter Φ.
In figuur 3/2.13-2 is een grafische voorstelling gegeven van de energie van een vrij elektron in een brok metaal. Hieruit blijkt duidelijk dat deze energie naar nul streeft als het de rand van het metaal nadert.



Figuur 3/2.13-2: De energie van een vrij elektron in functie van de positie ten opzichte van de rand van het metaal.

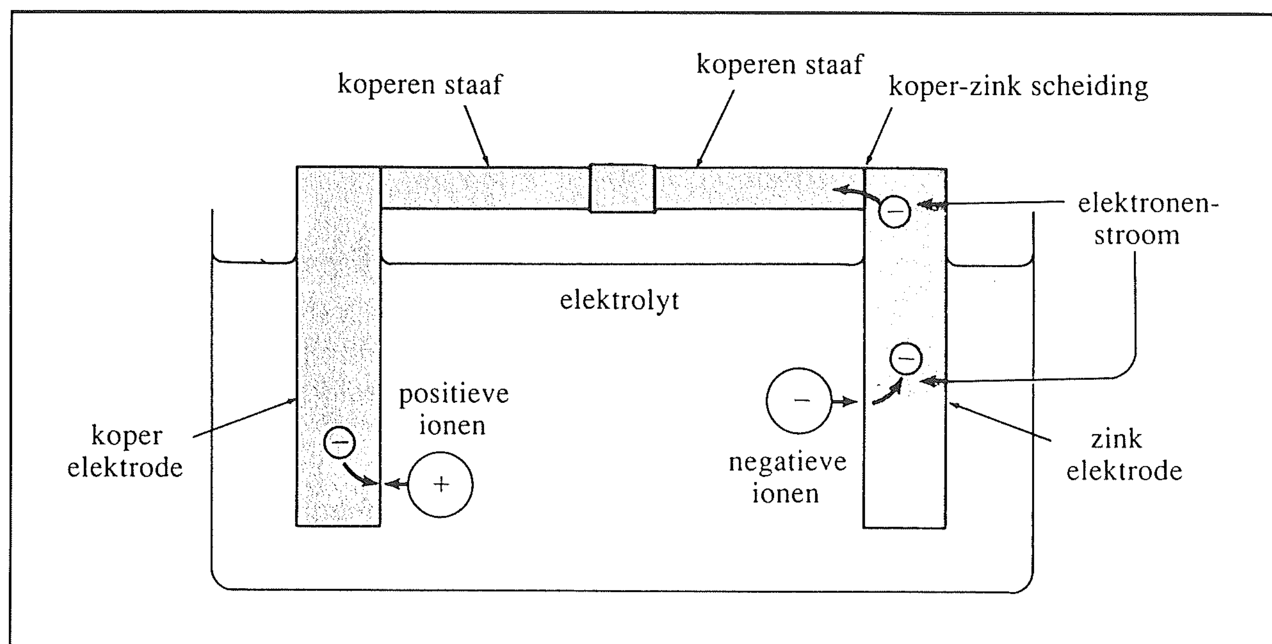
Het Seebeck verschijnsel

Het feit dat de vrije elektronen in verschillende metalen verschillende energieën hebben heeft zeer verstrekkende gevolgen. Stel dat men twee metalen zeer star aan elkaar bevestigd, bijvoorbeeld zink en koper. Beide metalen hebben verschillende waarden van Φ, met als gevolg dat er daar waar de atomen van het zink en de atomen van het koper elkaar raken een energieverschil optreedt.
Dit wordt verduidelijkt aan de hand van figuur 3/2.13-3.



Figuur 3/2.13-3: Het Seebeck verschijnsel ontstaat door het verschil in energie tussen de vrije elektronen in twee metalen.

2.13 Elektrochemie



Figuur 3/2.13-4: De verklaring van de werking van de Volta-cel.

Er ontstaat een energieverschil van ongeveer 1 eV, met als gevolg dat de vrije elektronen in het zink nu gemakkelijker uit het zinkverband kunnen ontsnappen en overgaan naar het koperverband. Er ontstaat dus in het grensvlak van beide metalen een elektronenstroom van het zink naar het koper. Dit verschijnsel was er de oorzaak van dat de kikkerpoot van Galvani samen trok!
Een kleine tijd nadat de twee metalen zijn samengevoegd ontstaat er evenwicht in het systeem. Er bestaat dan aan het zinkoppervlak een tekort aan negatieve lading en aan het koperoppervlak een tekort aan positieve lading. Het geheel lijkt dan een beetje op een geladen condensator. Tussen beide metalen ontstaat een ladingsverschil en bijgevolg ook een spanningsverschil.

De cel van Volta

Dank zij het theoretische werk van Arrhenius en de beschreven ontwikkelingen in het denken over vrije elektronen was men in staat de cel van Volta wetenschappelijk te verklaren.
Een moderne uitvoering van de cel van Volta bestaat, zie figuur 3/2.13-4, uit een elektrolytisch bad gevuld met verdund zwavelzuur, waarin een koperen en een zinken plaat worden gedompeld. Deze platen worden de “elektroden” genoemd. Stel dat beide platen door middel van een koperen staaf verbonden worden. Er ontstaat dan, bij de zinken plaat, een punt waar het koper en het zink innig met elkaar verbonden zijn, de “koper-zink scheiding”. Zoals beschreven zal dit tot gevolg hebben dat elektronen uit het zink naar het koper kunnen ontsnappen. Via de koperen staaf kunnen deze elektronen zich echter vrijelijk verspreiden over het gehele koperoppervlak, zodat ook dat gedeelte van de koperen plaat dat ondergedompeld is een overschot aan elektronen gaat vertonen. Uiteraard zal de zinken plaat, die is ondergedompeld in de vloeistof een teveel aan positieve ionen gaan vertonen. Er ontstaat dus een spannings-

verschil tussen beide platen. Men krijgt nu te maken met de reeds beschreven elektrolytische dissociatie. De atomen van het in het water aanwezige zwavelzuur worden onderworpen aan een spanningsverschil en zullen zich splitsen in positieve ionen en negatieve ionen. De positieve ionen worden echter door de negatieve elektronen in de koperen plaat aangetrokken. De negatieve ionen uit de vloeistof worden aangetrokken door de zinken plaat.
De positieve ionen uit de vloeistof verenigen zich weer met de negatieve elektronen in de koperen plaat tot atomen. De positieve ionen nemen dus elektronen op uit de koperen plaat! Hetzelfde gebeurt aan de zinken kant. Hier verenigen de negatieve ionen uit de vloeistof zich met het zink, waarbij de negatieve ionen elektronen afstaan aan de zinken plaat.
Het gevolg is dat het systeem niet in evenwicht komt: er kunnen elektronen door het systeem blijven vloeien, namelijk:
- van het zink naar het koper op de scheiding tussen beide metalen;
- van het koper naar de positieve ionen uit de vloeistof;
- van de negatieve ionen uit de vloeistof naar de zinken plaat.

Dat is de reden dat de cel van Volta niet maar heel eventjes, maar gedurende een vrij lange tijd spanning en stroom blijft produceren.

Perpetuum mobilae?
Het lijkt er op alsof de cel van Volta een echt perpetuum mobilae is. Het magische apparaat waar wetenschappers eeuwen naar gezocht hebben en dat voor eeuwig en altijd energie (of beweging) zou produceren. Ook Volta dacht een tijdje dat hij zo'n wonderlijk apparaat had uitgevonden. Immers: wie kan ontkennen dat de beschreven elektronenstroom niet voor altijd door de vloeistof en het koper/zink blijft vloeien?
Helaas is dat niet het geval en om dat te kunnen begrijpen is een zijsprong naar de chemie noodzakelijk.
Zwavelzuur is een stof waarvan één molecuul (het kleinste deeltje zwavelzuur) bestaat uit zeven atomen:
- twee waterstof atomen H;
- één zwavel atoom S
- vier zuurstof atomen O.

Volgens de afspraken in de chemie kan men de formule van zwavelzuur dan ook schrijven als H_2SO_4.
Nu is het zo, dat de vier atomen zuurstof een innige band hebben met het ene zwavel atoom. De twee waterstof atomen zijn veel losser aan het geheel gebonden. Het gevolg is dat, als men zwavelzuur verdunt met water, de waterstof atomen heel gemakkelijk uit het molecuulverband kunnen treden. Als gevolg van de elektrolytische dissociatie zullen de twee waterstof atomen uit het molecuul treden, waarbij echter hun elektronen achter blijven. Het gevolg is dat de reeds beschreven positieve ionen ontstaan, die dus in feite bestaan uit waterstof kernen. De negatieve ionen zijn opgebouwd uit de resterende atomen, dus zuurstof en zwavel. Het gevolg van de elektrolytische dissociatie is dus dat een molecuul zwavelzuur wordt gesplitst in twee positieve waterstof ionen H^+ en een negatief SO_4^- ion.
De positieve waterstof ionen migreren naar de koperen plaat en nemen daar het te veel aan elektronen op. Er ontstaat bijgevolg weer een neutraal waterstof atoom. Binnen de kortste keer zal de koperen plaat dan ook vol kleine gasbelletjes zitten, belletjes die bestaan uit zuiver waterstof. De negatieve ionen migreren naar de zinken plaat en geven daar hun te veel

2.13 Elektrochemie

aan elektronen af. De SO_4-groep zal zich echter onmiddellijk met het zink van de plaat chemisch binden, waarbij zinksulfaat $ZnSO_4$ wordt gevormd. De zinken plaat wordt dus als het ware "opgegeten" en zal dus langzaam maar zeker dunner worden.
Het proces van het genereren van spanning gaat dus niet eeuwig door, maar tot alle zwavelzuur is omgezet in enerzijds waterstof en anderzijds zinksulfaat. Op dat moment kunnen er geen ionen meer in de oplossing ontstaan en kunnen er dus geen elektronen via de beschreven ingewikkelde elektrochemische weg worden overgezet van de koperen naar de zinken plaat.
De spanning van het element valt weg en de Volta-cel kan alleen nieuw leven worden ingeblazen door opnieuw zwavelzuur in het water te gieten of door de zinken plaat te vervangen.

Polarisatie
In de praktijk zal de spanning van de cel echter veel eerder wegvallen. Op een bepaald moment sluiten niet alleen de zichtbare, maar ook de talloze onzichtbare microscopisch kleine waterstofgas belletjes de koperen plaat volledig af van het elektrolyt. De koperen plaat wordt dan als het ware geïsoleerd en er kan geen sprake zijn van elektronentransport. Dit verschijnsel noemt men de "polarisatie" van de cel.

Conclusie
Hoe valt het te verklaren dat een elektrische cel een spanning opwekt? Wie het naadje van de kous wil weten komt er snel achter dat dit een heel ingewikkeld proces is:
- twee metalen met een verschillende arbeidsfunctie moeten in innig contact worden gebracht;
- tezelfdertijd moeten beide metalen in een geïsoleerde bak worden opgesteld, waarin een elektrolyt aanwezig is;
- de elektronen die van het ene naar het andere metaal vloeien kunnen, dank zij de elektrolytische dissociatie, via het elektrolyt weer terug vloeien van het andere naar het ene metaal;
- de elektronen worden door de vloeistof getransporteerd via ionen, die ontstaan door het uit elkaar vallen van de moleculen van de chemische stof die men in het water heeft opgelost;
- door het elektronentransport via de ionen zullen deze ionen echter neerslaan op de twee platen;
- hierbij zullen deze ionen chemische verbindingen aangaan met het metaal van een van de platen (of met beide platen), waardoor nieuwe chemische stoffen ontstaan;
- hierdoor neemt de concentratie van de oorspronkelijk in het water opgeloste stof langzaam maar zeker af;
- op een bepaald moment is alle oorspronkelijke stof chemisch omgezet en houdt het elektronentransport via de ionen door de vloeistof op;
- de cel levert dan geen elektrische spanning meer.

De spanningsreeks
Tussen de twee metalen platen ontstaat een spanningsverschil als gevolg van de elektrolytische dissociatie. Proeven hebben aangetoond dat de grootte van deze spanning afhankelijk is van de soort metalen die wordt gebruikt. Men kan dus een tabel opstellen, waarin alle metalen gerangschikt worden naar de grootte van de spanning die zij genereren in een Voltacel.
Een dergelijke tabel noemt men *de spanningsreeks*.

2.13 Elektrochemie

MATERIAAL	SPANNING
GOUD	+1,50 V
PLATINA	+ 0,86 V
ZILVER	+ 0,80 v
KWIK	+ 0,79 V
KOOLSTOF	+0,74 V
KOPER	+ 0,34 V
BISMUTH	+ 0,28 V
ANTIMOON	+ 0,14 V
WATERSTOF	0 V
LOOD	- 0,13 V
TIN	- 0,14 V
NIKKEL	- 0,23 V
KOBALT	- 0,29 V
CADMIUM	- 0,40 V
IJZER	- 0,44 V
CHROOM	- 0,56 V
ZINK	- 0,76 V
MANGAAN	- 1,10 V
ALUMINIUM	- 1,67 V
MAGNESIUM	- 2,40 V
NATRIUM	- 2,71 V
KALIUM	- 2,92 V
LITHIUM	- 2,96 V

Figuur 3/2.13-5: De spanningsreeks van de in cellen en batterijen gebruikte materialen.

Zoals steeds als er sprake is van het definiëren van de grootte van een spanning, moet ergens een referentiepotentiaal gedefinieerd worden. In dit geval wordt hiervoor waterstof genomen, dat gelijk gesteld wordt met een potentiaal van 0 V.
De spanningsreeks van de meest bekende metalen en andere stoffen is gegeven in figuur 3/2.13-5. Om een cel met een maximale uitgangsspanning te maken moet men twee metalen kiezen die zo ver mogelijk uit elkaar liggen in de spanningsreeks en een voor deze metalen geschikt elektrolyt kiezen. Maar natuurlijk spelen ook andere factoren, zoals prijs, giftigheid, verkrijgbaarheid, lange termijn stabiliteit een zeer belangrijke rol. Aan de hand van deze spanningsreeks kan men eenvoudig berekenen hoe het kwam dat Volta uit zijn zuil een spanning van 1,1 V haalde. De spanning van koper ten opzichte van waterstof bedraagt +0,34 V. De spanning van zink ten opzichte van waterstof bedraagt -0,76 V. Men hoeft beide spanningen maar bij elkaar op te tellen om de spanning te weten die ontstaat in een cel die wordt gevormd uit zink- en koperplaten: 1,1 V. Nu moet wel opgemerkt worden dat ook het soort elektrolyt en de concentratie ervan een bepaalde rol spelen bij de uitgangsspanning die een cel kan afleveren.

De cel van Leclanché

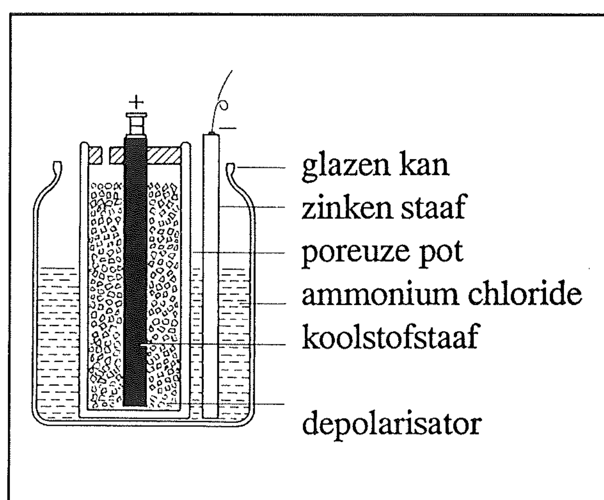
In principe zijn er ontelbare combinaties van platen en elektrolyten mogelijk. Natuurlijk zullen niet alle combinaties praktisch bruikbaar zijn. Het komt er op neer een combinatie te vinden die:

- goedkoop is;
- niet te giftige stoffen bevat;
- betrouwbaar is;
- een vrij hoge celspanning levert;
- niet te veel last heeft van polarisatie;
- geen brandbare of giftige gassen produceert;
- gemakkelijk te fabriceren is.

De cel van Volta komt om diverse redenen niet in aanmerking om het etiket "praktisch bruikbare cel" opgeplakt te krijgen. De eer om de eerste praktisch bruikbare elektrische cel te maken komt toe aan Georges Leclanché.

2.13 Elektrochemie

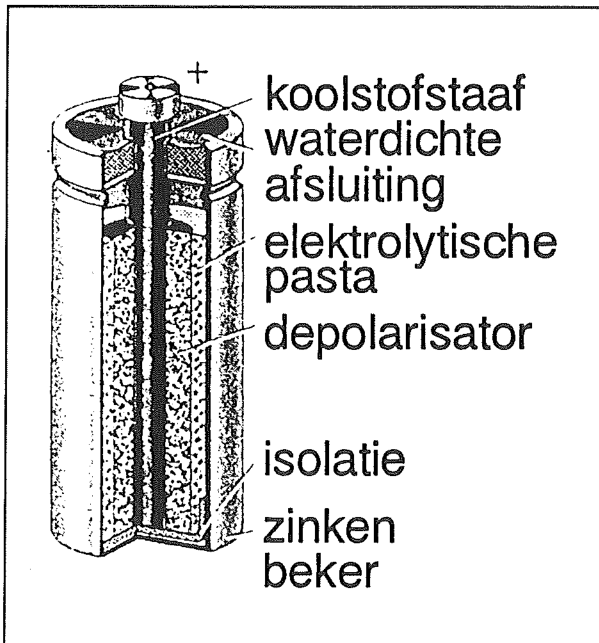
Deze Fransman maakte in 1865 een cel, waarvan de samenstelling getekend is in figuur 3/2.13-6. Deze cel gaat sindsdien door het leven onder de naam cel van Leclanché en deze vormt nu nog steeds de basis van een heleboel batterijen die in iedere supermarkt verkrijgbaar zijn.



Figuur 3/2.13-6: De eerste uitvoering van de cel van Leclanché.

De cel bestaat uit een glazen pot, die gevuld wordt met een verdunde oplossing van ammonium chloride (salmiac) als elektrolyt. De ene elektrode wordt gevormd door een zinken staaf, de tweede door een staaf uit koolstof. De koolstof staaf hangt echter niet rechtstreeks in het elektrolyt, maar zit in een poreuze pot, die gevuld is met een menging van koolstofpoeder en magnesium oxide. Deze stoffen gaan het polariseren van de cel tegen. Ook nu wordt op de positieve pool waterstof gas gevormd.
Het magnesium oxide zorgt er echter voor dat dit waterstof gas een chemische reactie aangaat, waardoor het gebonden wordt en de koolstaaf niet met microscopische gasbelletjes kan afsluiten. Uit de spanningsreeks kan men afleiden dat de cel van Leclanché een spanning afgeeft van 0,74 V + 0,76 V = 1,5 V.
De cel van Leclanché werd zeer lang overal toegepast. Het enige nadeel van de cel is dat de depolarisator vrij traag werkt. Als er een grote stroom uit de cel getrokken wordt, zal er zoveel waterstof gas rond de koolstaaf ontstaan, dat het magnesium oxide niet in state is dit om te zetten. Vandaar dat de cel dan toch langzaam polariseert, met als gevolg dat de spanning gaat dalen.
Als men de cel nadien echter een tijdje niet belast zal het magnesium oxide zijn werk blijven doen en het gevormde waterstof omzetten. Nadien levert de cel weer zijn volle spanning van 1,5 V.

De moderne Leclanché cel
Moderne cellen volgens dit oeroude principe worden bijvoorbeeld gebruikt in platte batterijen van 4,5 V. Hierin zijn drie Leclanché cellen in serie geschakeld, waaruit de uitgangsspanning van 4,5 V verklaard wordt.
Natuurlijk is het vrij onpraktisch om een cel te voorzien van een vloeistof als elektrolyt. Men kan echter ook een waterachtige pasta gebruiken, die de eigenschap heeft niet uit te vloeien. De samenstelling van zo'n moderne cel is getekend in figuur 3/2.13-7. De zinken beker vormt nu zowel de behuizing van de cel als de negatieve pool. Als positieve pool wordt weer een koolstof staaf toegepast. Het elektrolyt wordt gevormd door een salmiacoplossing te vermengen met bindmiddelen, waar vroeger zaagsel voor werd gebruikt. Op deze manier ontstaat een vrij vaste pasta, die echter toch nog waterig genoeg is om de elektrolytische dissociatie te laten plaats vinden.



Figuur 3/2.13-7: De samenstelling van een moderne "droge" Leclanché-cel.

Een dergelijke cel wordt "droog" genoemd, omdat het elektrolyt aanwezig is onder de vorm van een pasta.

Eigenschappen van elektrische cellen

Net zoals bij alle elektronische componenten, kunnen de eigenschappen van elektrochemische cellen beschreven worden door een aantal parameters. De voornaamste hiervan worden nu gedefinieerd.

- De emk

  Emk is de afkorting van "elektromotorische kracht". Het is de spanning die de cel levert bij "open" keten, dus zonder belasting. "Open" staat tussen aanhalingstekens, omdat een cel natuurlijk (dat volgt uit het werkingsprincipe) alleen spanning kan afgeven als de kring gesloten is. Anders kan er geen sprake zijn van het noodzakelijke elektronentransport. Maar de cel wordt natuurlijk belast als men er een spanningsmeter op aansluit en deze zeer kleine belasting is groot genoeg om het principe in werking te zetten. De waarde van de emk is afhankelijk van de aard van de twee platen en onafhankelijk van de grootte van de elektroden. De emk gaat dalen als de cel polariseert en is in geringe mate ook afhankelijk van de verzadiging en de temperatuur van het elektrolyt.
- De inwendige weerstand

  De inwendige weerstand van een cel hangt op de eerste plaats af van het oppervlak van de twee elektroden. Hoe groter deze zijn, hoe lager de inwendige weerstand. De inwendige weerstand gaat dalen als te temperatuur stijgt en is in bepaalde mate ook afhankelijk van de verzadiging van het elektrolyt.
- Het regime

  Het regime is de maximale stroom die de cel kan leveren zonder dat er polarisatie kenmerken optreden. Het regime is voornamelijk afhankelijk van de kenmerken van de toegepaste depolarisator.
- De capaciteit

  De capaciteit is de hoeveelheid elektriciteit, uitgedrukt in Ampère-uur (Ah) die de cel kan leveren vanaf het moment van de samenstelling tot het moment van volledige uitputting. De capaciteit hangt af van de afmetingen van de platen en van de gebruikte materialen.

Schakelen van cellen

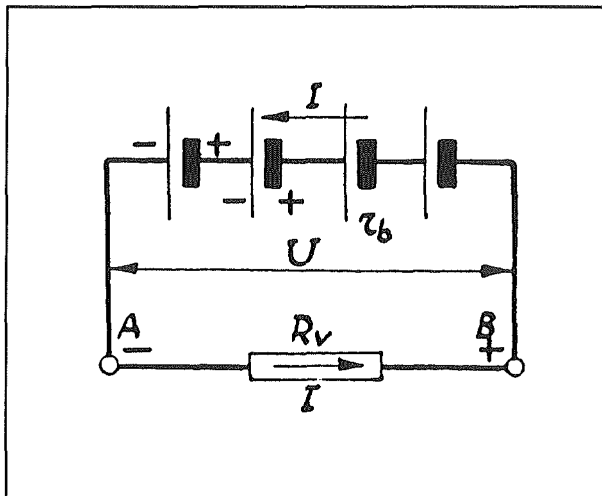
Elektrochemische cellen kunnen, net zoals weerstanden en condensatoren, in serie of in parallel worden geschakeld. In de meeste gevallen spreekt men dan van een "batterij".

Hierdoor worden de eigenschappen beïnvloedt.

2.13 Elektrochemie

Serie schakeling van cellen

Bij de serie schakeling, voorgesteld in figuur 3/2.13-8, wordt de positieve pool van de ene cel verbonden met de negatieve pool van de tweede en zo verder. In de meeste gevallen zal men identieke cellen in serie schakelen, maar zuiver theoretisch is dat geen voorwaarde. De serie schakeling levert een totale spanning die wordt voorgesteld door U en een stroom die wordt voorgesteld door I.



Figuur 3/2.13-8: Het in serie schakelen van elektrochemische cellen.

- De emk
  De totale emk van de batterij is gelijk aan de som van de emk's van de in serie geschakelde cellen. Zijn alle cellen identiek, dan volstaat het dus de celspanning te vermenigvuldigen met het aantal cellen dat in serie is opgenomen.
- De inwendige weerstand
  De cellen staan in serie en dus ook hun inwendige weerstanden. De totale inwendige weerstand van de batterij is gelijk aan de som van de individuele inwendige weerstanden.
- Het regime
  Als identieke cellen in serie worden geschakeld, is het regime van de batterij gelijk aan het regime van één cel. Schakelt men niet-identieke cellen in serie, dan wordt het regime van de batterij gelijk aan het regime van de cel die het laagste eigen regime heeft. Hieruit blijkt dat het zeer onvoordelig is niet-identieke cellen in serie op te nemen. De grote stromen, die cellen met een groot eigen regime kunnen leveren, kunnen toch niet geleverd worden.
- De capaciteit
  De stroom I vloeit door alle cellen, zodat alle identieke cellen na dezelfde tijd uitgeput zullen raken. De capaciteit verandert dus niet bij de serie schakeling. Zet men niet-identieke cellen in serie, dan wordt de totale capaciteit bepaald door de cel die de laagste eigen capaciteit heeft.

Parallel schakeling van cellen

Bij de parallel schakeling van cellen, voorgesteld in figuur 3/2.13-9, worden alle positieve polen met elkaar verbonden en alle negatieve polen met elkaar verbonden. Het is absoluut verboden cellen die een verschillende eigen-emk hebben parallel te schakelen. Hierdoor ontstaan grote verliesstromen in de schakeling, waardoor bepaalde cellen binnen de kortste keren volledig uitgeput raken of zelfs kunnen beschadigen!

De specifieke eigenschappen van de parallel geschakelde combinatie zien er nu als volgt uit.

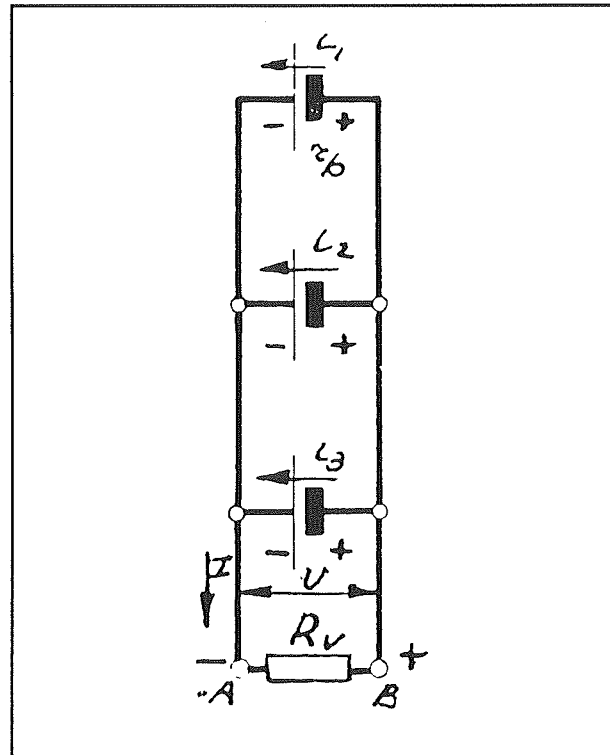
- De emk
  De emk van de batterij is nu gelijk aan de eigen-emk van de cellen.
- De inwendige weerstand
  De totale inwendige weerstand van de batterij is gelijk aan de eigen inwendige

weerstand van de cellen, gedeeld door het aantal parallel geschakelde cellen. Batterijen die grote stromen moeten leveren, kunnen dus het best worden samengesteld uit parallel geschakelde cellen.

- Het regime
  De individuele stromen i1, i2, etc vormen samen de uitgangsstroom I van de batterij. In de veronderstelling dat alle cellen dezelfde stroom i leveren, wordt de totale stroom dus gelijk aan het eigen regime van de cel, vermenigvuldigd met het aantal parallel geschakelde cellen. Batterijen die zijn samengesteld uit parallel geschakelde cellen kunnen dus zeer hoge stromen leveren. Deze stromen kunnen zo groot zijn dat men er zeer verstandig aan doet zekeringen in de schakeling op te nemen. Zou men ongezekerde parallel geschakelde cellen per ongeluk kortsluiten, dan zal de kortsluitstroom zo groot zijn dat draden gloeiend heet kunnen worden en brand kan ontstaan!
- De capaciteit
  De capaciteit van de batterij is gelijk aan de eigen capaciteit van de cellen, vermenigvuldigd met het aantal cellen.

In wezen heeft de parallel schakeling van elektrochemische cellen dus een heleboel voordelen.

In vele opzichten vormt een dergelijke batterij een ideale spanningsbron met een lage inwendige weerstand, grote stroomleverantie en een aanvaardbare capaciteit. Het grote nadeel van de parallelschakeling is uiteraard dat de emk vrij laag is. Uit de spanningsreeks van figuur 3/2.13-5 volgt immers dat de maximale emk van een elektrochemische cel theoretisch nooit meer dan ongeveer 4,5 V kan bedragen!



Figuur 3/2.13-9: De parallel schakeling van cellen.

Het principe van accumulatoren

Inleiding

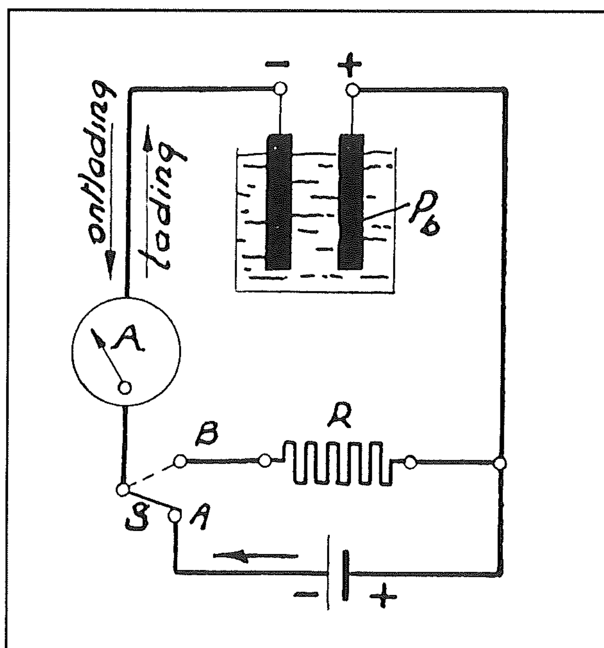
De in het vorige subhoofdstuk behandelde elektrochemische cellen worden “primaire cellen” genoemd. Zij werken nietomkeerbaar. Als de cel is uitgeput kan men deze niet opnieuw opladen. Daarnaast heeft men echter ook “secundaire cellen” ontwikkeld. Deze secundaire cellen worden in het dagelijks spraakgebruik “accumulatoren” afgekort tot accu’s, genoemd. Accumulatoren zijn eigenlijk opstapelaars of verzamelaars van elektrische energie. Als men aan een accumulator elektrische energie toevoegt, wordt deze

2.13 Elektrochemie

omgezet in chemische energie. Dat noemt men het opladen van de accu. Na het opladen blijft de energie in de chemische samenstelling van de accu aanwezig. Gaat men nadien de accu elektrisch belasten, dan zet de chemische energie zich weer om in elektrische. Dit noemt men het ontladen van de accu. In principe kan het proces van laden en ontladen eindeloos herhaald worden.

De eerste accumulator

De uitvinding van de accumulator wordt toegeschreven aan de Franse natuurkundige Planté. In 1860 deed hij een proef die wordt toegelicht aan de hand van figuur 3/2.13-10. In een glazen bak werden twee loden elektroden opgehangen in een bad met verdund zwavelzuur. Het zal duidelijk zijn dat een dergelijke opstelling nooit een primaire elektrochemische cel kan vormen, omdat twee platen van hetzelfde metaal worden toegepast.



Figuur 3/2.13-10: Het experiment dat aan de basis ligt van de uitvinding van de accumulator.

De twee loden platen kunnen via een ampère-meter en een omschakelaar S worden aangesloten op een primaire cel of op een weerstand. Als de schakelaar S in de stand A wordt gezet, wordt geconstateerd dat er een stroom uit de cel naar de opstelling vloeit. Na enige tijd wordt deze stroom steeds lager en zal tot nul afnemen. Als men nu de opstelling los koppelt van de cel door de schakelaar om te schakelen van A naar B, stelt men vast dat er weer een stroom door de kring gaat vloeien, maar nu in tegengestelde richting. Als er een stroom vloeit, dan moet er ook een spanning zijn. Nu is het zeer onwaarschijnlijk dat die spanning ontstaat in de weerstand R of in de ampèremeter A! De voor de hand liggende conclusie is dat alleen de bak met loden platen en zwavelzuur verantwoordelijk kan zijn voor het ontstaan van een spanning in de kring. Men stelt vast dat de stroom na een tijdje kleiner wordt en naar nul afneemt.

Conclusies

Planté was in staat de volgende conclusies te trekken:

- Blijkbaar is een bak gevuld met verdund zwavelzuur waarin twee loden platen hangen in staat elektriciteit te "bewaren". De constructie lijkt dus een beetje op een Leidsche fles (condensator), die dat ook kan.
- Die elektriciteit blijft echter zeer lang in de bak opgeslagen. Dit was dus een groot verschil met de Leidsche fles, waar de opgeslagen elektriciteit zeer snel weer verdwenen was.
- De opgeslagen elektriciteit uit zich doordat er tussen de beide loden platen een spanning gemeten kan worden.
- De opgeslagen elektriciteit kan op ieder gewenst moment weer nuttig ge-

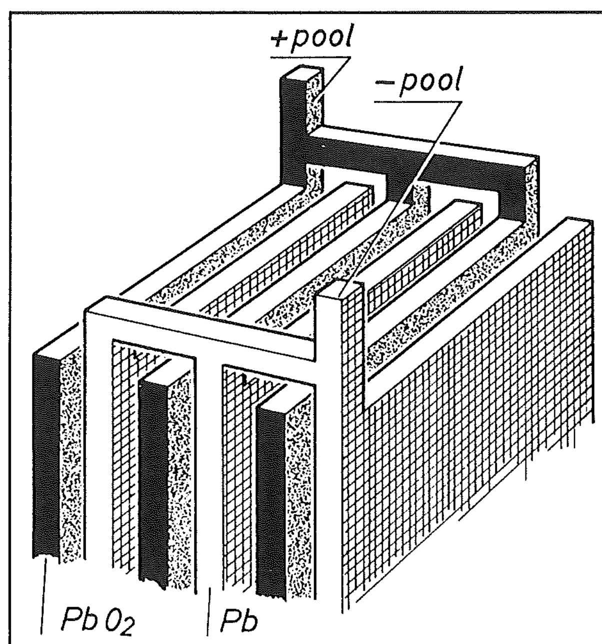
bruikt worden, door de loden platen te verbinden met een verbruiker.

- Het proces kan vele malen herhaald worden.

In principe had Planté dus een geweldige uitvinding gedaan! Helaas kon men er in die tijd heel weinig mee aanvangen. Het heeft immers geen enkele zin om de elektriciteit, die door een primaire elektrochemische cel wordt gegenereerd, via deze omslachtige weg beschikbaar te stellen. Had men ergens elektriciteit nodig, dan kon men veel beter rechtstreeks een primaire cel, zoals een Volta-zuil, maken. Een accumulator laden door middel van elektrochemische cellen is een energieomzetting die bijzonder weinig nut heeft! Eerst toen, veel later, uitvinders zoals Siemens en Gramme dynamo's hadden uitgevonden, kreeg de ontdekking van Planté echt een heel groot praktisch nut.

De moderne loodaccu

Het zal wel duidelijk zijn dat moderne loodaccumulator nog wel volgens hetzelfde principe werkt als de allereerste uitvoering van Planté, maar dat meer dan honderd jaar technologie toch wel de nodige verfijningen heeft aangebracht. Zo zal een cel van een moderne accu nooit meer bestaan uit twee ordinaire platen lood. Er wordt gebruik gemaakt van een sandwichconstructie, zie figuur 3/2.13-11, opgebouwd uit vele platen lood die om en om parallel worden geschakeld. Op deze manier wordt het werkzame oppervlak van beide elektroden vergroot, zonder dat dit ten koste gaat van de afmetingen van de cel. Bovendien wordt geen zuiver lood gebruikt. De platen zijn vervaardigd van een lood-antimoon legering, die veel beter bestand is tegen de inwerking van zwavelzuur. Een reeks platen (de negatieve pool) wordt voorzien van een laag zeer fijn verdeeld zuiver lood Pb, de andere reeks (de positieve pool) wordt bedekt met een dunne laag loodperoxide PbO_2. Dank zij deze constructie neemt de levensduur en het rendement van de batterij toe.



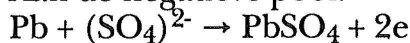
Figuur 3/2.13-11: De samenstelling van de cel van een moderne loodaccu.

De energie uitwisseling

De elektrische energie ontstaat door het omzetten van het Pb en het PbO_2 in loodsulfaat $PbSO_4$, dit natuurlijk onder invloed van de elektrolytische dissociatie van het zwavelzuur H_2SO_4.

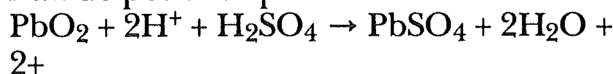
Tijdens het ontladen van de loodaccu gebeurt het volgende.

Aan de negatieve pool:



$Pb + (SO_4)^{2-} \rightarrow PbSO_4 + 2e$

Aan de positieve pool:

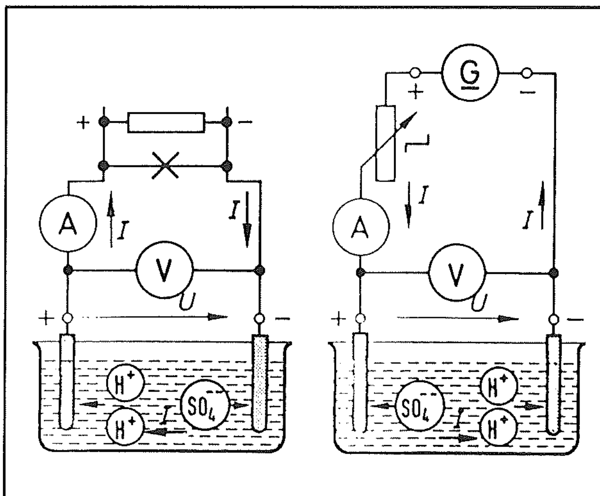


$PbO_2 + 2H^+ + H_2SO_4 \rightarrow PbSO_4 + 2H_2O +$
2+

Bij het laden van een accu gebeurt het tegenovergestelde. Het op beide platen gevormde loodsulfaat wordt weer omge-

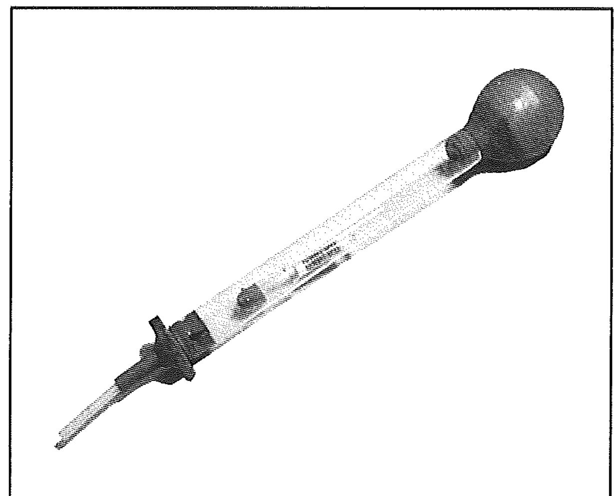
2.13 Elektrochemie

zet in enerzijds lood en anderzijds loodperoxide.
Het zijn dus de gedissocieerde ionen van het zwavelzuur (H^+ en SO_4^{2-}) die zorgen voor het elektronentransport door de vloeistof, zowel bij laden als bij ontladen. Dit verschijnsel wordt overzichtelijk voorgesteld in figuur 3/2.13-12.



Figuur 3/2.13-12: Het ionentransport door de vloeistof bij het laden (rechts) en ontladen (links) van een loodaccu.

Wie veel met accu's werkt, bijvoorbeeld voor de stroomvoorziening van een boot of een camper, wordt aangeraden zo'n metertje, areometer genoemd, aan te schaffen! De zuurgraad geeft namelijk een veel betere indicatie van de toestand van de accu dan een eenvoudige klemspanningmeting.



Figuur 3/2.13-13: Een zuurmeter of areometer, waarmee men de laadtoestand van een loodaccu kan controleren.

De zuurgraad

De zuurgraad, ofwel de concentratie van zwavelzuur, van een loodaccu is een belangrijke eigenschap, omdat deze parameter een indicatie geeft over de laadtoestand van de accu. Uit de chemische formules blijkt dat gedurende het ontladen het zwavelzuur wordt omgezet in zwavelsulfaat. Hoe meer de accu ontladen wordt, hoe lager de concentratie van het zwavelzuur in de oplossing. De zuurgraad gaat dus dalen naarmate een accu meer ontladen raakt. Er zijn kleine apparaatjes in de handel, zie figuur 3/2.13-13, waarmee men de zuurgraad van een loodaccu op een eenvoudige manier kan meten.

Een areometer is niets anders dan een metertje, waarmee men het soortelijk gewicht van een vloeistof kan meten. Bij een volledig ontladen accu bedraagt het soortelijk gewicht van de zwavelzuur oplossing 1,14 g/cm^3. Deze waarde stijgt tot 1,28 g/cm^3 als de accu volledig geladen is.

Het laden van een loodaccu

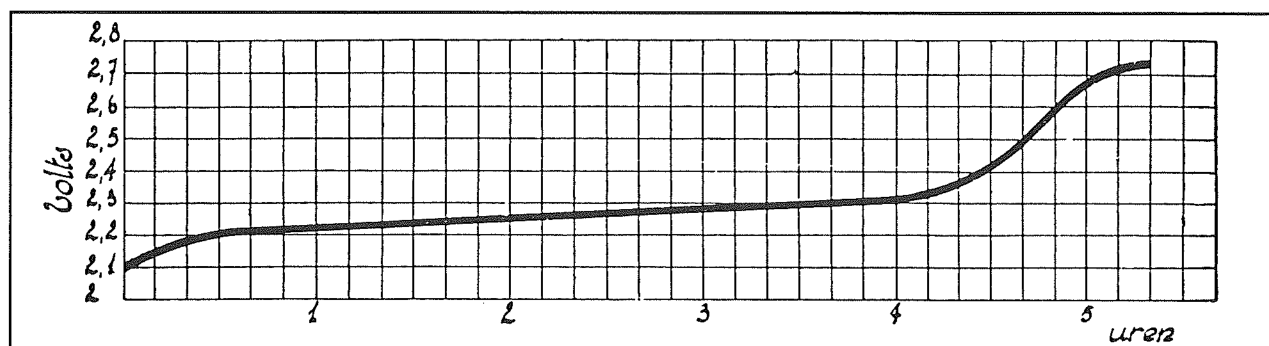
Accumulatoren worden gekenmerkt door een heleboel eigenschappen, waarvan de laad- en ontlaadcurves de belangrijksten zijn. De laadcurve geeft aan hoe de klemspanning van een cel stijgt in functie van de laadtijd. Bij een loodaccu heeft de laadcurve het typisch verloop dat in figuur

3/2.13-14 getekend is. Een volledig ontladen cel van een loodaccu heeft een klemspanning van 2,1 V. Bij het laden van de accu stijgt de celspanning vrij snel tot 2,2 V en gaat nadien zeer langzaam oplopen tot 2,3 V. Nadien gaat de spanning in snel tempo oplopen tot 2,7 V, waarbij men opmerkt dat er een grote gasontwikkeling in de cel optreedt en het elektrolyt niet meer helder is, maar melkachtig. Een klemspanning van 2,7 V is de einde-laad spanning. Verder laden heeft geen enkele zin en is zelfs zeer schadelijk voor de levensduur van de cel.
De karakteristieke verschijnselen bij het bereiken van de volle lading zijn:
- de klemspanning van een cel bereikt de waarde 2,7 V en zal op deze waarde stabiliseren;
- de positieve platen krijgen een kastanje-achtige kleur;
- de negatieve platen zijn grijs;
- er ontstaat overvloedige ontwikkeling van waterstof gas;
- het elektrolyt krijgt een melkachtige kleur;
- de dichtheid van het elektrolyt is gestegen tot 1,28 g/cm^3.

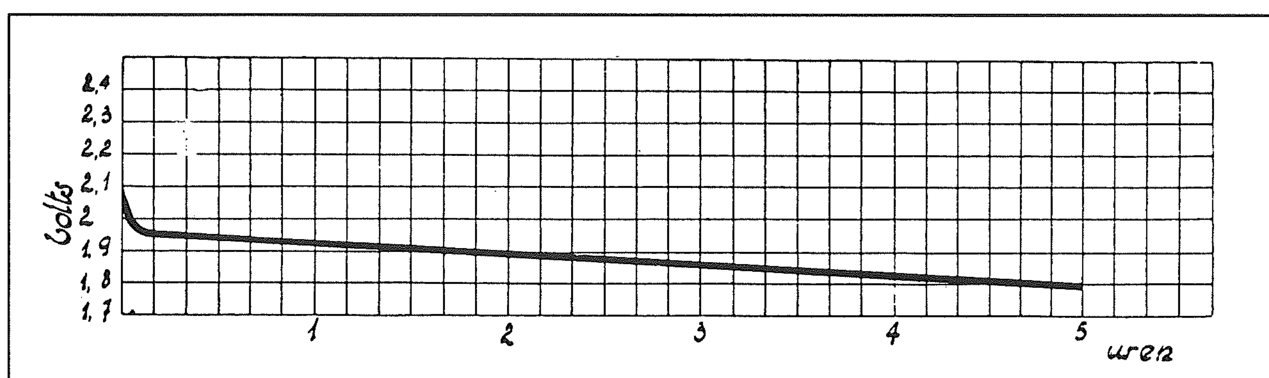
Het ontladen van een loodaccu
Op het moment dat de laadstroom wordt uitgeschakeld, zal de einde-laad spanning van 2,7 V zeer snel terug vallen tot ongeveer 2,1 V. Als de cel van de accu belast wordt, dan zal de celspanning heel snel gaan dalen tot 1,9 V. Daarna daalt de spanning heel geleidelijk tot 1,8 V. Dit noemt men de einde-ontlaad spanning van de cel. Verder ontladen heeft dan geen zin en is zelfs gevaarlijk voor de levensduur van de cel.
Deze gegevens kunnen worden samengevat tot de ontlaadcurve, getekend in figuur 3/2.13-15.

Karakteristieken van een accumulator
Net zoals een primaire cel, heeft ook een secundaire cel bepaalde karakteristieken. Deze zijn uiteraard vergelijkbaar met deze van de primaire cel, maar er zijn toch ook enige verschillen.
- De emk
  Dit is natuurlijk weer de klemspanning die men over de twee polen van een cel kan meten. Voor loodcellen bedraagt deze emk 2,7 V bij volledige lading en 1,8 V bij volledige ontlading. De waarde van de emk is volledig onafhankelijk van de grootte van de cel.
- De inwendige weerstand
  De inwendige weerstand van secundaire cellen is zeer laag. Natuurlijk is de waarde van de inwendige weerstand in sterke mate afhankelijk van het oppervlak van de platen. Een typische loodaccu heeft een inwendige weerstand van slechts 10 mΩ! Het zal dus wel zonder meer duidelijk zijn dat het kortsluiten van een volledig geladen accu een zeer grote kortsluitstroom tot gevolg heeft, die zelfs vrij dikke koperdraden onmiddellijk tot gloeien brengt!
- Het regime
  Het regime is de maximale waarde van de laad- en de ontlaadstromen. Voor het laden wordt als vuistregel een maximale stroom van 1 A gehanteerd per kg lood. Voor het ontladen geldt de dubbele waarde. Er is een andere redenering die uitgaat van de capaciteit (zie volgend punt). Men stelt dan de maximale laad- en ontlaadstromen gelijk zijn aan $^{een}/_{tiende}$ van de capaciteit. Een loodaccu met een capaciteit van 48 Ah zou dus maximaal geladen en ontladen mogen worden met 4,2 A. Overschrijden van deze waarde gedurende een lange tijd heeft het krom trekken van de elektroden tot gevolg.

2.13 Elektrochemie



Figuur 3/2.13-14: De laadcurve van de cel van een loodaccu.



Figuur 3/2.13-15: De ontlaadcurve van de cel van een loodaccu.

– De capaciteit
  De capaciteit is de hoeveelheid elektriciteit, uitgedrukt in ampère-uur, die een volledig geladen accumulator kan leveren van het ogenblik dat de ontlading start tot het moment dat de celspanning gedaald is tot 1,8 V. De capaciteit is dus het product van de ontlaadstroom en het aantal ontlaaduren. Een accu met een capaciteit van 500 Ah kan dus maximaal gedurende 10 uur ontladen worden met een stroom van 50 A. De capaciteit is afhankelijk van de hoeveelheid actief plaatmateriaal in de accu, dus in feite van het oppervlak van de platen, maar ook van de zuurgraad van het elektrolyt.

– Het rendement
  Het rendement is de verhouding tussen de opgenomen energie gedurende de lading en de afgegeven energie gedurende de ontlading.
  Uiteraard wordt er meer energie opgenomen dan afgegeven, zodat het rendement in ieder geval een getal moet zijn dat lager is dan 1. Accumulatoren kunnen echter een erg hoog rendement hebben, waarden tussen 0,85 en 0,95 zijn geen uitzondering. Ware het niet dat de meeste accumulatoren chemische stoffen gebruiken die niet erg milieuvriendelijk zijn, dan zouden deze apparaten ideale energiereservoirs zijn!

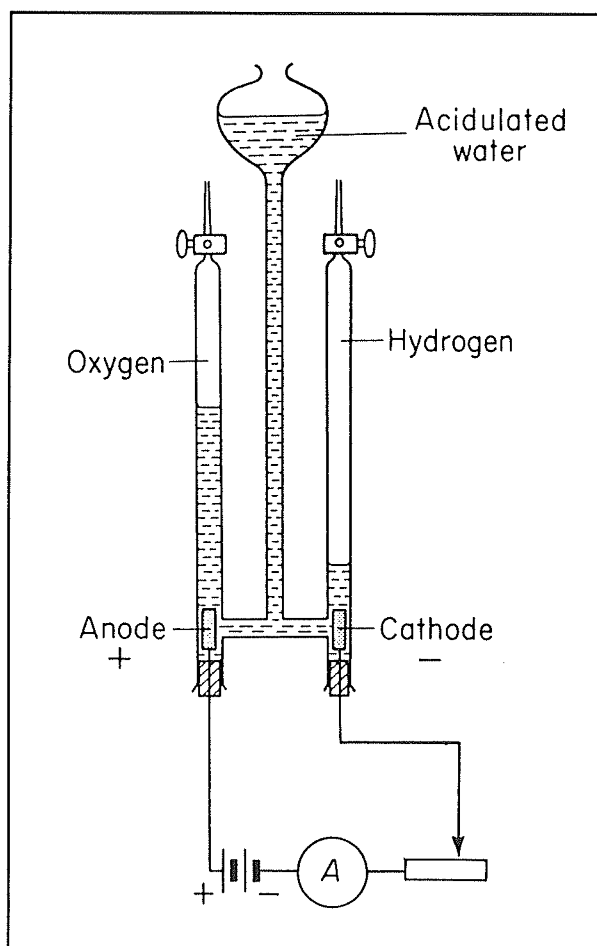
Het principe van elektrolyse

Ontleding van stoffen

Een andere tak van de elektrochemie houdt zich bezig met het ontleden van stoffen. Zoals bekend bestaan alle stoffen uit moleculen. Dit zijn de kleinste bouwstenen van de stof, die nog alle eigenschappen van de stof hebben. Een molecuul keukenzout is dus een uiterst klein korreltje zout, dat nog als dusdanig herkenbaar is. Moleculen bestaan op hun beurt weer uit atomen. Het is de samenstelling van de atomen in een molecuul, die een bepaalde stof zijn specifieke eigenschappen geeft.
Een molecuul water bestaat uit twee atomen waterstof en een atoom zuurstof en wordt chemisch dan ook geschreven als H_2O. Een molecuul keukenzout bestaat uit een atoom natrium en een atoom chloor en gaat door het leven met de formule NaCl.
Dank zij de elektrochemie kan men chemische stoffen ontleden in hun atomen. Of, met andere woorden, de elektrochemie stelt ons in staat moleculen te splitsen in hun atomen. Het zal duidelijk zijn dat dit een heel nuttige toepassing is, die in de wetenschap en de chemische analyse vaak gebruikt wordt.

De ontdekking van de elektrolyse

Er zijn verschillende geleerden, zoals Volta, Davy en Faraday, die experimenten op het gebied van elektrolyse hebben uitgevoerd.
De Duitse fysicus Hofmann was echter de eerste die serieuze, analytisch verantwoorde experimenten uitvoerde op het gebied van de elektrolyse. Hij bouwde een apparaat, dat "Voltameter" werd genoemd en er uit zag zoals voorgesteld in figuur 3/2.13-16. Het glazen apparaat bestaat uit drie buizen die met elkaar in verbinding staan. De middelste buis is het voorraadvat, waarlangs de te onderzoeken oplossing wordt aangevoerd. De linker en rechter buizen hebben aan de onderzijde kleine elektroden van platina, waartussen een gelijkspanning wordt aangesloten. Beide buizen zijn voorzien van een kraantje, zodat de gassen die eventueel geproduceerd worden ter analyse afgetapt kunnen worden.



Figuur 3/2.13-16: De Voltameter van Hofmann, die gebruikt werd voor het experimenteren met het verschijnsel elektrolyse.

2.13 Elektrochemie

Bij de eerste experimenten werd de opstelling volledig gevuld met gedestilleerd water, waaraan een paar druppeltjes zuur werden toegevoerd om er zeker van te zijn dat de vloeistof een bepaalde mate van elektrische geleidbaarheid zou gaan vertonen.
De twee kraantjes werden opengedraaid en er werd via de middelste buis zoveel aangezuurd water in het apparaat gegoten, totdat dit water uit beide kraantjes spoot.
Nadien werden de kraantjes gesloten. Op deze manier is men er zeker van dat er alleen water in het apparaat zit en alle gassen verdreven zijn. Vervolgens werd een primaire cel, die in serie staat met een ampèremeter en een regelbare weerstand, tussen de twee elektroden aangesloten. Na het sluiten van de stroomkring merkte Hofmann op dat er een stroom door het apparaat ging lopen en dat er aan beide elektroden kleine gasbelletjes ontstonden. Deze belletjes stijgen uiteraard op in de twee buitenste glazen buizen. Het apparaat is echter zo geconstrueerd dat het absoluut onmogelijk is dat gasbelletjes die aan de linker elektrode ontstaan in de rechter buis terecht komen.
De twee buitenste buizen worden met gas gevuld, dat het aangezuurde water terug drukt naar de middelste kolom. Hofmann merkte op dat in de buis die verbonden was met de negatieve pool van de primaire cel exact twee keer zo veel gas ontstond dan in de linker kolom. Na enige tijd is er in beide buizen zo veel gas gevormd dat dit via de kraantjes afgetapt kan worden en onderzocht.
Hofmann ontdekte dat aan de negatieve pool zuiver waterstof gas ontstond en aan de positieve pool zuiver zuurstof gas en wel in de verhouding 2/1.

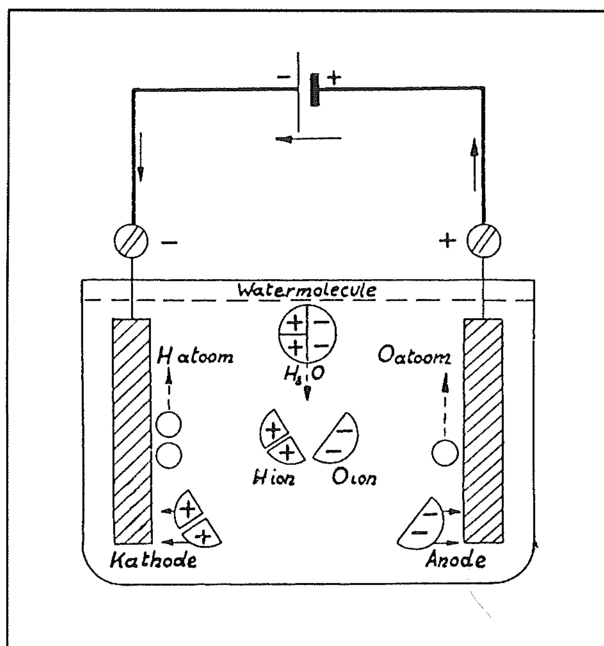
Conclusies
Hofmann concludeerde dat de twee gassen afkomstig moesten zijn van het water in de buis. Water bestaat dus uit zuurstof en waterstof. De vraag blijft natuurlijk over of er nog andere chemische elementen in water zitten. Die vraag kan met het apparaat van Hofmann natuurlijk beantwoord worden. Laat men de opstelling dagen lang onder spanning staan, en laat men de gevormde gassen regelmatig ontsnappen, dan zal men vaststellen dat er steeds minder en minder water achterblijft en dat op het laatst zelfs alle water is omgezet in gas. Hofmann kon dus gerust de conclusie trekken dat water uit niets anders bestaat dan waterstof en zuurstof. Blijkbaar zit er bovendien twee keer zoveel waterstof dan zuurstof in water, waardoor Hofmann veronderstelde dat de samenstelling van water niets meer of minder dan H_2O moest zijn.
Het apparaat dat door Hofmann was geconstrueerd baarde nogal wat opzien in de wetenschappelijke wereld van die dagen. Het was immers het eerste apparaat waarmee men via een omweg diep in de materie kon kijken en de voor het menselijke oog absoluut onwaarneembare moleculaire micro-micro-microscopische wereld kon exploreren.

Verklaring
De verklaring van de experimenten van Hofmann is voor de moderne wetenschap natuurlijk gemakkelijk te geven. Uiteraard berust ook dit verschijnsel volledig op de elektrolytische dissociatie. Een watermolecuul kan blijkbaar gemakkelijk dissociëren in een positief geladen H^+ ion en een negatief geladen OH^- ion. Zolang de vloeistof niet aan een elektrisch veld wordt onderworpen zwerven deze ionen rond, binden zich tot watermoleculen,

2.13 Elektrochemie

dissociëren weer tot ionen, etc. De toestand van water is een beetje te vergelijken met deze van een metaal, waar vrije elektronen van atoom tot atoom kunnen zwerven en een spoor van positieve ionen achterlaten.

Zet men water echter onder spanning, dan zullen de positieve H^+ ionen onmiddellijk worden aangetrokken door de negatieve elektrode en de negatieve OH^- ionen door de positieve pool, zie figuur 3/2.13-17.



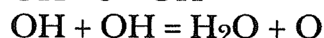
Figuur 3/2.13-17: Een watermolecuul H_2O splitst zich in twee ionen, die door de onder spanning staande elektroden worden aangetrokken.

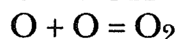
De H^+ ionen nemen elektronen over van de negatieve pool waar immers een overschot aan elektronen heerst en vormen waterstof gas:


$H^+ + e = H$

De OH^- ionen geven elektronen af aan de positieve plaat, waar een tekort aan elektronen heerst:


$OH^- - e = OH$


$OH + OH = H_2O + O$


$O + O = O_2$

De OH-combinatie is niet stabiel en op zoek naar partners. Uiteindelijk combineren twee OH-groepen zich tot één watermolecuul H_2O en één vrij zuurstof atoom O. Ook dit atoom is niet stabiel en verbindt zich bij de eerste de beste mogelijkheid met een ander zuurstof atoom tot een zuurstof molecuul O_2.

Het principe van de galvanotechniek

Geleidende stoffen verplaatsen

Tot slot van deze kennismaking met het verschijnsel elektrochemie nog enige woorden over de galvanotechniek.

Galvanisatie is een techniek waarmee het mogelijk wordt een geleidend materiaal te bedekken met een uiterst dun laagje van een ander geleidend materiaal. Door te galvaniseren kan men dunne laagjes goud opbrengen op contacten van schakelaars en andere elektronische onderdelen, kan men copieën van vreemdsoortig gevormde voorwerpen maken en kan men aluminium ramen bedekken met een laagje keihard oxide.

Ook het principe van galvanisatie berust natuurlijk op de elektrolytische dissociatie. Bepaalde eletrolyten worden in een bad gedissocieerd door er twee elektroden in op te hangen die aangesloten worden op een gelijkspanning. De ene elektrode is het voorwerp dat gegalvaniseerd moet worden, de andere elektrode be-

2.13 Elektrochemie

staat uit het metaal waarmee men het voorwerp wil bedekken. Negatieve ionen gaan naar de positieve plaat, positieve ionen naar de negatieve plaat. Op de platen verbinden de ionen zich met elektronen en vormen weer atomen. Deze atomen gaan bindingen aan, waardoor dunne laagjes goud, zilver, tin, etc. op een van de elektroden worden neergeslagen.

Indeling

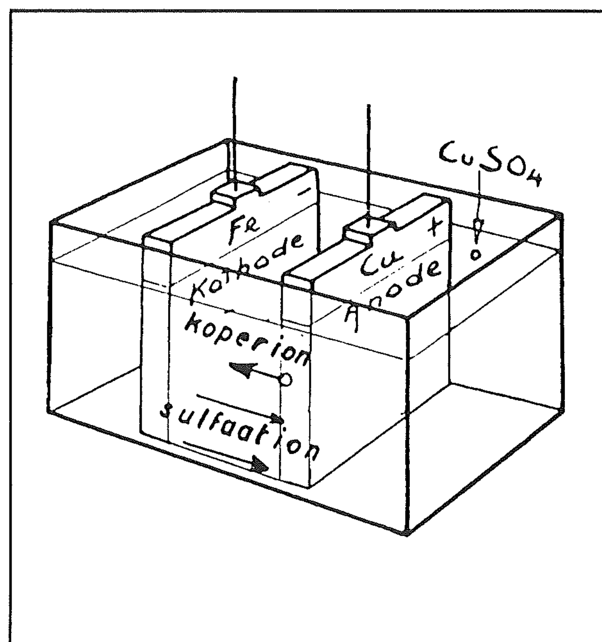
Het algemene begrip galvanotechniek wordt in de praktijk ingedeeld in:

- galvanostegie:
  hierbij is het de bedoeling zeer dunne laagjes (50 tot 100 µm) van een edel metaal neer te slaan op een minder edel metaal.
- galvanoplastiek:
  bij deze techniek worden dikkere lagen metaal (van millimeters tot zelfs centimeters) neergeslagen op een voorwerp, om zodoende een mal te maken waarmee men dit voorwerp kan copiëren.
- eloxeren:
  een speciale techniek die alleen bij aluminium wordt toegepast om het aluminium betere oppervlakte eigenschappen te geven.

Galvanostegie

Aan de hand van figuur 3/2.13-18 wordt een voorbeeld van deze techniek behandeld, namelijk het bedekken van een voorwerp uit ijzer met een dun laagje koper.

Er wordt een bad gemaakt, bestaande uit gedestilleerd water waarin kopersulfaat $CuSO_4$ wordt opgelost. Het ijzeren voorwerp wordt uiterst zorgvuldig schoongemaakt, in het bad gehangen en via een draad verbonden met de negatieve pool van een regelbare spanningsbron. Als tweede elektrode wordt een plaat uit zeer zuiver koper opgehangen en verbonden met de positieve pool.



Figuur 3/2.13-18: Het principe van galvanostegie.

De spanningsbron wordt ingeschakeld en ingesteld op een dusdanige spanning dat er een kleine stroom door het bad vloeit. Door de elektrolytische dissociatie ontbindt het kopersulfaat in positieve koper ionen Cu^{++} en negatieve sulfaat ionen SO_4^{--}. Onder invloed van het elektrisch veld gaan de positieve ionen naar het ijzeren voorwerp migreren en de negatieve naar de koperplaat. De koper ionen nemen uit het ijzer overbodige elektronen op, waardoor de ionen worden omgezet in volwaardige koper atomen. Deze atomen slaan neer op het ijzer, waardoor het ijzeren voorwerp langzaam maar zeker wordt bedekt door een zeer hecht, maar uiterst dun koperlaagje.

2.13 Elektrochemie

Stoffen	Symb.	Aantal grammen per 96 500 C	Elektrochemisch equivalent in mg/C	Neerslag in g/Ah
Aluminium	Al	9,04	0,0936	0,3370
Chroom	Cr	17,37	0,18	0,64
Goud	Au	65,75	0,6872	2,4523
Koper	Cu	31,8	0,328	1,186
Lood	Pb	103,46	1,0717	3,8581
Nikkel	Ni	29,35	0,2996	1,0786
Tin	Sn	59,54	0,617	2,22
Waterstof	H	1,008	0,0104	0,0374
IJzer	Fe	28,01	0,2962	1,0474
Zilver	Ag	107,92	1,118	4,0248
Zink	Zn	32,71	0,3385	1,2186
Zuurstof	O	8,02	0,083	0,2988

Figuur 3/2.13-19: De elektrochemische equivalenten van enige vaak bij galvanisatie toegepaste stoffen.

De sulfaat ionen geven hun negatieve lading af aan de koperen plaat, waardoor uiteindelijk weer kopersulfaat ontstaat.

Voorwaarden
Het is niet zo dat iedere combinatie van geleidende materialen met ieder mogelijk elektrolyt bruikbaar is om bijvoorbeeld goud neer te slaan. Hiervoor heeft men in ieder geval een gouden elektrode nodig als positieve elektrode en zeer bepaalde goud bevattende chemische zouten, die erg duur zijn.

De wet van Faraday
Galvaniseren is geen nieuwe ontdekking. In de tijd dat de elektriciteitsleer echt tot bloei kwam was dit verschijnsel al bekend. Het zal wel duidelijk zijn dat het publiek in die tijd zeer onder de indruk was van dit soort aan toverij grenzende gebeurtenissen. Het verschijnsel galvanisatie werd dan ook uitvoerig bestudeerd omdat zelfs aan het einde van de negentiende eeuw het middeleeuws geloof dat goud goedkoop gemaakt kon worden niet helemaal verdwenen was. Lukte het niet met de alchemistische middelen van de middeleeuwen, dan kon het misschien met de nieuwe verschijnselen die met elektriciteit te maken hebben!
Hoe dan ook, een man als Faraday heeft uitvoerige experimenten uitgevoerd rond het thema galvanisatie, met als gevolg dat er een paar belangrijke wetmatigheden werd ontdekt, dat door het leven gaat als "de elektrochemische wetten van Faraday".

- Eerste wet van Faraday
  De hoeveelheid neergeslagen stof is alleen afhankelijk van de stroomsterkte die door het bad vloeit en van de tijd die de bewerking duurt.
- Definitie van het elektrochemisch equivalent
  Het elektrochemisch equivalent *g* van een stof is het gewicht van deze stof, die in een galvanisch bad per seconde wordt neergeslagen bij een stroomsterkte van 1 A.

2.13 Elektrochemie

- Tweede wet van Faraday
  De hoeveelheid neergeslagen stof G kan gegeven worden door de formule:
  $G = g . I . t$

In de tabel van figuur 3/2.13-19 is het elektrochemisch equivalent van enige stoffen gegeven. Hieruit blijkt dat een stroom van 1 A per seconde 0,328 mg zuiver koper op een elektrode kan neerslaan.

Galvanoplastiek
Stel dat een museum een zeer zeldzaam archeologisch beeldje heeft en er copieën gemaakt moeten worden voor andere musea en universiteiten. Natuurlijk bestaan er verschillende methoden om een dergelijk probleem op te lossen. Eén van die mogelijkheden is de galvanoplastiek. Het beeldje wordt nu voor de helft bespoten met een dunne laag grafiet: in alcohol opgeloste zeer fijn verpoederde zuivere koolstof. Hierdoor ontstaat op het beeldje een zeer dunne laag van een elektrisch geleidende stof. Het beeldje wordt nu in een elektrolytisch bad gehangen als negatieve elektrode. Als positieve elektrode wordt een koperen plaat gebruikt, als elektrolyt kopersulfaat. Na het inschakelen van de stroom zal het reeds beschreven proces plaats vinden, waardoor het grafiet op het beeldje langzaam bedekt wordt met een laagje koper. Als men maar lang genoeg galvaniseert, wordt de koperen laag zo dik als men wil. Als de laag is aangegroeid tot 1 á 2 mm haalt men het beeldje uit het bad en verwijderd de koperen halve mal. Men herhaalt het proces nu, waarbij de tweede helt van het beeldje wordt behandeld. Men krijgt dus twee zeer nauwkeurig gevormde, stevige koperen mallen, die men kan gebruiken om zoveel exemplaren van het beeldje te gieten als men nodig heeft.

Eloxeren
Eloxeren is een specifieke toepassing van de galvanostegie, waarmee men het zachte, kwetsbare oppervlak van aluminium kan verstevigen. Men brengt een aluminium werkstuk, bijvoorbeeld een raam, als positieve elektrode in een galvanisch bad aan. Als negatieve elektrode wordt een plaat lood gebruikt, als elektrolyt verdund zwavelzuur. Door de elektrolytische dissociatie ontstaat aan de positieve elektrode zuivere zuurstof. Deze bindt zich onmiddellijk met het aluminium, waarbij zeer zuiver aluminium oxide wordt gevormd. Het zal duidelijk zijn dat dit proces in alle hoeken en gaten van het aluminium werkstuk plaats vindt, zodat het aluminium met een egale laag oxide wordt bedekt. Aluminium oxide heeft enige zeer gunstige eigenschappen. Het is zeer hard, zodat het zachte aluminium afdoende wordt beschermd tegen mechanische beschadigingen. Bovendien is aluminium oxide uitstekend bestand tegen allerlei externe invloeden, zoals koude, hitte, regen, UV-straling, etc. Bovendien kan aluminium oxide heel gemakkelijk ingekleurd worden, waardoor het eloxeren toelaat zeer specifiek gekleurde aluminium ramen op de markt te brengen.

2.13 Elektrochemie